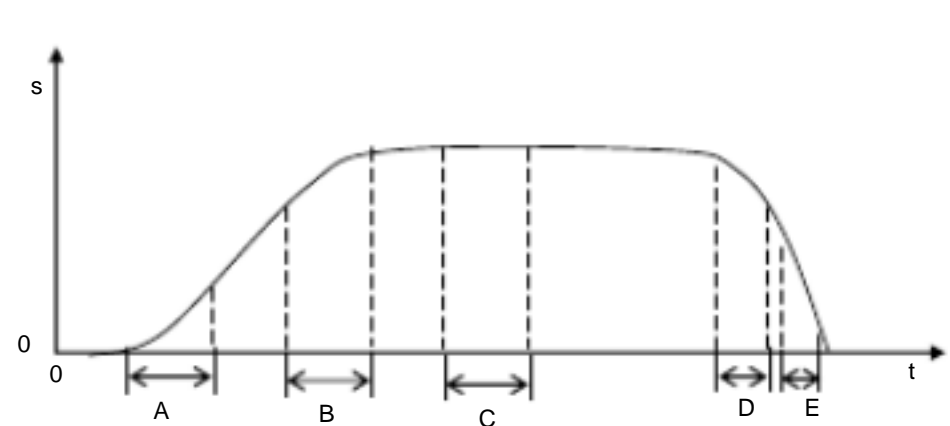


第一章 质点运动

习题解答

一、分析题

1. 一辆车沿直线行驶，习题图 1-1 给出了汽车车程随时间的变化，请问在图中标出的哪个阶段汽车具有的加速度最大。

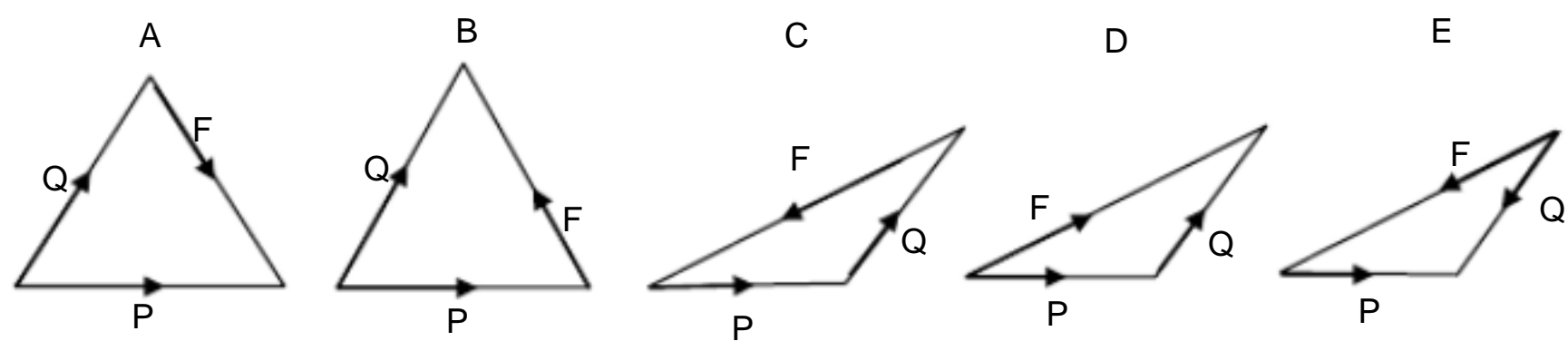


习题图 1-1

答: E。

位移-速度曲线斜率为速率，E 阶段斜率最大，速度最大。

2. 有力 \vec{P} 与 \vec{Q} 同时作用于一个物体，由于摩擦力 \vec{F} 的存在而使物体处于平衡状态，请分析习题图 1-2 中哪个可以正确表示这三个力之间的关系。

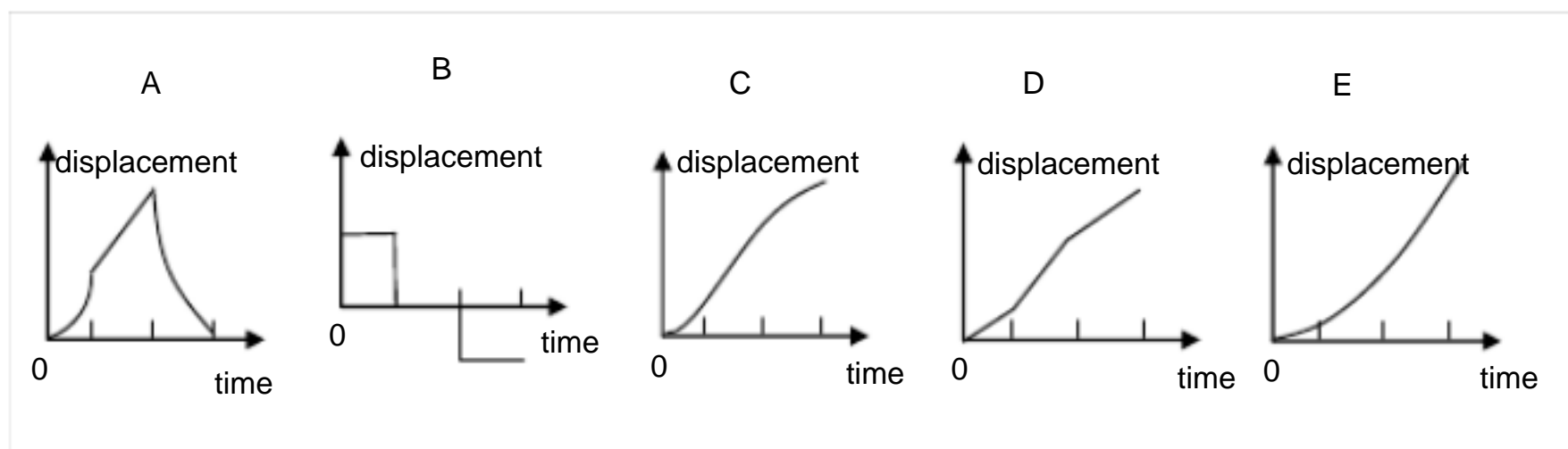
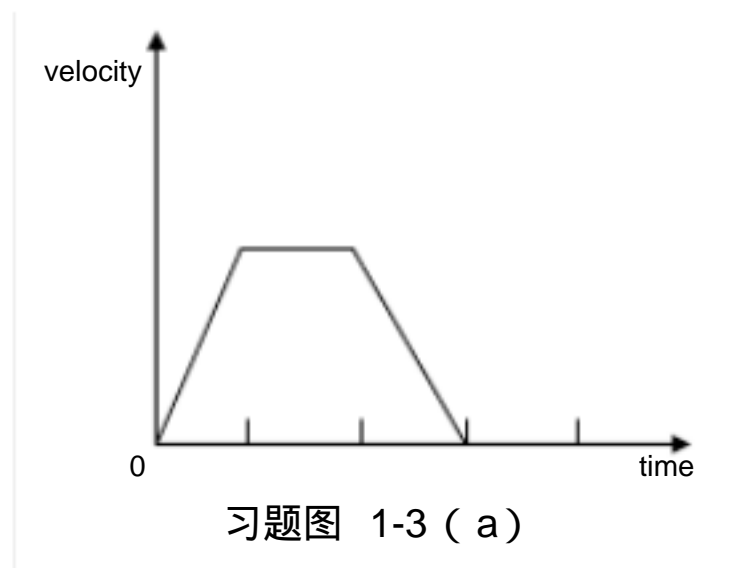


习题图 1-2

答: C。

三个力合力为零时，物体才可能处于平衡状态，只有 (C) 满足条件。

3. 习题图 1-3 (a) 为一个物体运动的速度与时间的关系，请问习题图 1-3 (b) 中哪个图可以正确反映物体的位移与时间的关系。

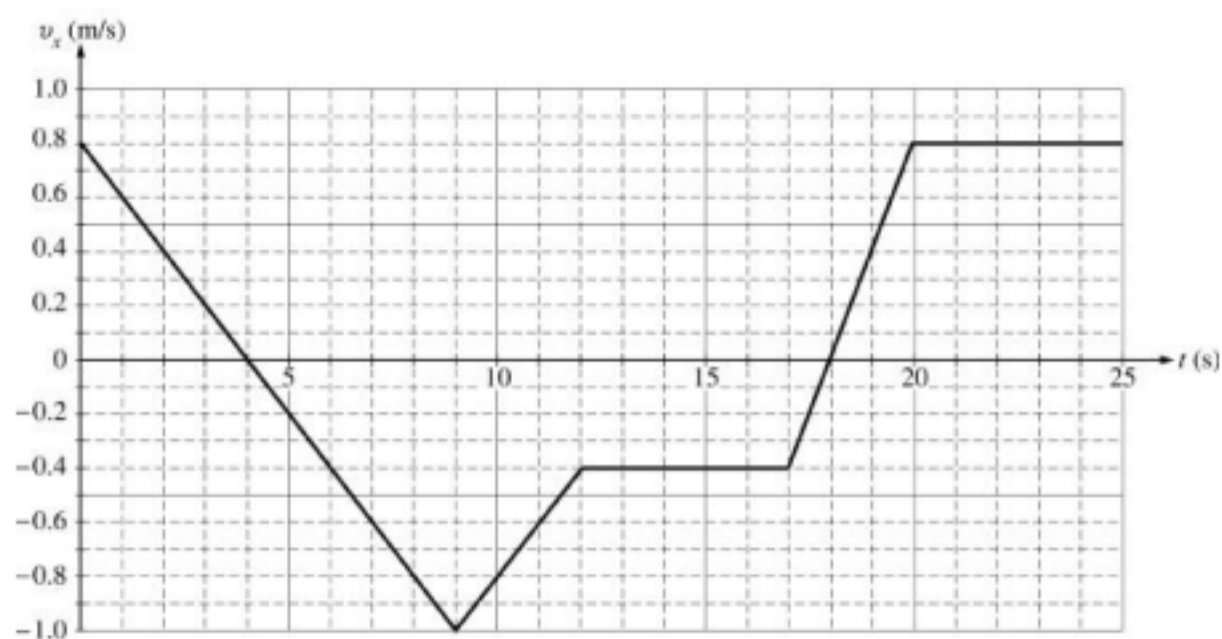


答：C。

由 $v-t$ 图可知，速度先增加，然后保持不变，再减少，但速度始终为正，位移一直在增加，且三段变化中位移增加快慢不同，根据 $v-t$ 图推知 $s-t$ 图为 C。

三、综合题：

1．质量为 0.50kg 的物体在水平桌面上做直线运动，其速率随时间的变化如习题图 1-4 所示。问：（1）设 $t = 0\text{s}$ 时，物体在 $x = 2.0\text{cm}$ 处，那么 $t = 9\text{s}$ 时物体在 x 方向的位移是多少？（2）在某一时刻，物体刚好运动到桌子边缘，试分析物体之后的运动情况。



解：（1）由 $v-t$ 可知， $0\sim 9$ 秒内物体作匀减速直线运动，且加速度为：

$$a = \frac{0.8}{4} \text{ cm/s}^2 = 0.2 \text{ cm/s}^2$$

由图可得： $s_0 = 2.0\text{cm}$ ， $v_0 = 0.8\text{cm/s}$ ， $v_t = -1.0\text{cm/s}$ ，则由匀减速直线运动的

位移与速度关系可得：

$$2a(s-s_0) = v_t^2 - v_0^2$$

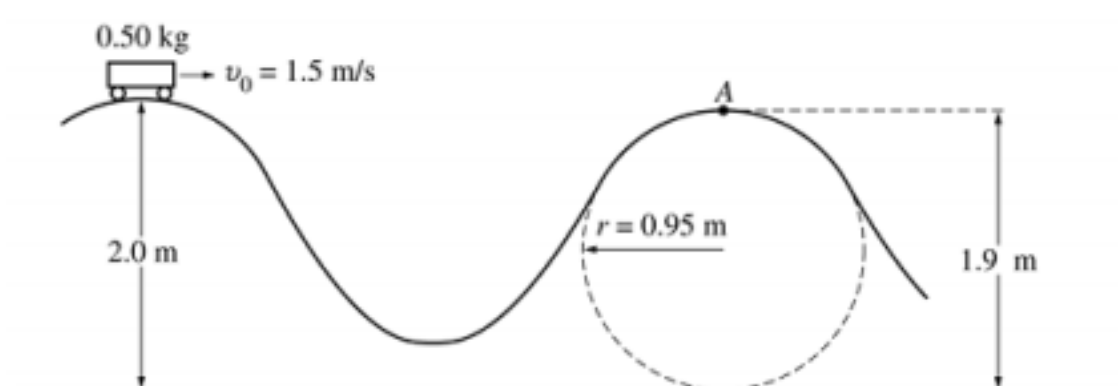
$$s = (v_t^2 - v_0^2) / 2a + s_0$$

$$= [0.8^2 - (-1.0)^2] / 2 \times 0.2 + 2.0 \text{ cm}$$

$$= 1.1 \text{ cm}$$

(2) 当物体运动到桌子边缘后，物体将以一定的初速度作平抛运动。

2. 设计师正在设计一种新型的过山车，习题图 1-5 为过山车的模型，车的质量为 0.50kg，它将沿着图示轨迹运动，忽略过山车与轨道之间的摩擦力。图中 A 点是一个坡道的最高点，离地高度为 1.9m，该坡道的上半部分为一半径为 0.95m 的半圆。若车从离地 2.0m 的轨道最高点除出发，初始速度为 $v_0 = 1.5 \text{ m/s}$ ，(1) 试求过山车到达 A 点的速度；(2) 计算在 A 点时，轨道对过山车的作用力；(3) 如果要使车停在 A 点，就必须对车施加某种摩擦力，试求摩擦力应该做多少功，才能使车静止在 A 点；(4) 假设要让过山车在 A 点沿轨道下降之前，刚好能实现与轨道之间没有力的作用，请设想该如何对轨道的设计进行修改，并加以证明。



解：(1) 在过山车运动过程中机械能守恒，过山车离地最高点的机械能与 A 点机械能相等，则

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgH_0 = \frac{1}{2}mv_A^2 + mgH$$

$$v_A = \sqrt{2g(H_0 - H) + v_0^2}$$

$$= \sqrt{2 \times 10 \times (2.0 - 0.95) + 1.5^2} \text{ m/s}$$

$$= 2.06 \text{ m/s}$$

(2) 由牛顿第二定律得：

$$mg - N = \frac{v_A^2}{r}$$

$$N = mg - \frac{mv_A^2}{r}$$

$$= 0.50 \times 10 - \frac{0.50 \times 2.06^2}{0.95} \quad \text{N}$$

$$= 2.76 \text{ N}$$

(3) 若要使车停在 A 点，则摩擦力作的功应正好等于车在无摩擦力条件下 A 点的动能，则

$$W_f = \frac{1}{2} mv_A^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 0.50 \times 2.06^2 \text{ J}$$

$$= 1.06 \text{ J}$$

(4) 若要使车在 A 点时 $N=0$ ，由牛顿第二定律得：

$$mg = m \frac{v_A'^2}{r_A} \quad (1)$$

由机械能守恒定律得：

$$\frac{1}{2} mv_0^2 + mgH = \frac{1}{2} mv_A'^2 + 2mgr_A \quad (2)$$

联立 两式可得：

$$r_A = \frac{v_0^2 + 2gH_0}{5g}$$

$$= \frac{1.5^2 + 2 \times 10}{5 \times 10} \text{ m}$$

$$= 0.85 \text{ m}$$

可见，如果把 A 点轨道半径减少为 0.85m，过山车在 A 点与轨道之间没有力的作用。还有一种办法是调整起始最高点与离地高度，同理，可将最高点离地高度升高为 2.38m。

3. (缺图)如习题图 1- 6 所示，火箭模型的质量为 0.25kg， $t = 0$ 时刻，发射引擎推动力 $F = 20.0 \text{ N}$ ，并持续作用 2s，然后引擎停止工作，火箭继续上升，当火箭上升到一定高度后，开始竖直下落。请问：(1) 在前 2s 的运行过程中，火箭的平均加速度是多少？(2) 火箭到达的最大高度是多少？(3) 火箭到达最大高度的时间是多少？

解：(1) 由动量定理得：

$$(F - mg)t = mv$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{F - mg}{m} t \\ &= \frac{20 - 0.250 \times 10}{0.250} \times 2 \text{m/s} \\ &= 140 \text{m/s} \end{aligned}$$

则平均加速度为：

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{140 - 0}{2} \text{m/s}^2 = 70 \text{m/s}^2$$

(2) 在前 2s 时间内，火箭近似作匀加速直线运动，则

$$2aH = v_t^2 - v_0^2 = v_t^2$$

$$H = \frac{v_t^2}{2a} = \frac{140^2}{2 \times 70} \text{m} = 140 \text{m}$$

在 2s 以后，火箭在重力作用下做匀减速直线运动，直到速度减为 0，则

$$-2gH' = v_t^2 - v_0^2$$

$$H' = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{140^2}{2 \times 10} \text{m} = 980 \text{m}$$

则火箭上升的最大高度为：

$$\begin{aligned} H_{\max} &= H + H' \\ &= 140 + 980 \text{m} = 1120 \text{m} \end{aligned}$$

(3) 火箭在重力作用下，速度减为 0 的时间为：

$$-gt = v_t - v_0$$

$$t = \frac{v_0}{g} = \frac{140}{10} \text{s} = 14 \text{s}$$

则火箭到达最大高度的时间为：

$$T = 14 \text{s} + 2 \text{s} = 16 \text{s}$$

4. (缺图) 如习题图 1- 7 所示，原长 $l_0 = 0.2 \text{m}$ 的弹簧，一端被固定在光滑的水平桌面上，另一端连着一个 $m_1 = 8.0 \text{kg}$ 的物体，同时该物体又通过定滑轮与 $m_2 = 4.0 \text{kg}$ 的物体相连（绳和定滑轮质量不计）。当整个系统达到平衡状态时，

弹簧的长度 $l = 0.25\text{m}$ ，物体 m_2 离地高度为 $h = 0.70\text{m}$ 。试求：（1）弹簧的劲度系数；（2）如果从 P 点将绳子切断，物体 m_2 多久后落地；（3）绳子切断后，物体 m_1 的振动频率以及 m_1 达到的最大速度。

解：（1）由胡克定律得：

$$m_2 g = k(l - l_0)$$

$$k = \frac{m_2 g}{l - l_0} = \frac{4.0 \times 10}{0.25 - 0.2} \text{ N/m} = 800 \text{ N/m}$$

（2）绳子断后 m_2 作自由落体运动，则

$$H = \frac{1}{2} g t^2$$

$$t = \sqrt{2H / g} = \sqrt{2 \times 0.70 / 10} \text{ s} = 0.37 \text{ s}$$

（3）由弹簧振子的振动频率得：

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{2m_1}} = \sqrt{\frac{800}{8}} \text{ rad/s} = 10 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{10}{2 \times 3.14} \text{ Hz} = 1.59 \text{ Hz}$$

由机械的守恒定律得：

$$\frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{\max}^2$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m_1}} x_{\max}$$

$$= \sqrt{\frac{k}{m_1}} (l - l_0)$$

$$= \sqrt{\frac{800}{8.0}} \times (0.25 - 0.2) \text{ m/s}$$

$$= 0.5 \text{ m/s}$$

5、(缺图) (答案有差异) 如习题图 1-8 所示，两个小孩在玩雪橇，雪橇 A 与人的总质量为 250kg ，雪橇 B 与人的总质量为 200kg ，两雪橇之间的距离为 15m 。最初雪橇 B 静止，雪橇 A 从静止开始以加速度 1.5m/s^2 加速到 5m/s 后匀速运动，试问：（1）雪橇 A 撞上雪橇 B 需要多少时间？（2）两雪橇碰撞后，雪

橇 B 的运动速度为 4.8m/s 、方向向右，雪橇 A 的速度是多少？（ 3 ）两雪橇的碰撞是完全弹性碰撞吗？

解：（ 1 ）雪橇 A 在速度达到 5m/s 前作匀加速直线运动，则

$$v_A = at_1$$

$$t_1 = \frac{v_A}{a} = \frac{5}{1.5} \text{ s} = 3.33 \text{ s}$$

雪橇 A 向右运动的距离为：

$$s_1 = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \times 1.5 \times 3.33^2 \text{ m} = 8.33 \text{ m}$$

之后，A 作匀速直线运动，碰到雪橇 B 的运动时间为：

$$t_2 = \frac{15 - s_1}{v_A} = \frac{15 - 8.33}{1.5} \text{ s} = 1.33 \text{ s}$$

则 A 撞上 B 需要的时间为：

$$t = t_1 + t_2 = 3.33 + 1.33 \text{ s} = 4.66 \text{ s}$$

（ 2 ）由动量守恒定理得：

$$m_A v_A = m_A v_A' + m_B v_B$$

$$v_A' = \frac{m_A v_A - m_B v_B}{m_A} \\ = \frac{250 \times 5 - 200 \times 4.8}{250} \text{ m/s}$$

$$= 1.16 \text{ m/s} \quad \text{雪橇 A 的速度向右}$$

（ 3 ）碰撞前 A、B 的总动能为：

$$E_{k0} = \frac{1}{2} m_A v_A^2 = \frac{1}{2} \times 250 \times 5^2 \text{ J} = 3125 \text{ J}$$

碰撞后两者的总动能为：

$$E_k = \frac{1}{2} m_A v_A'^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 \\ = \frac{1}{2} \times 250 \times 1.16^2 + \frac{1}{2} \times 200 \times 4.8^2 \text{ J} = 2472 \text{ J}$$

可见碰撞前后系统与动能不守恒，碰撞为不完全弹性碰撞。

6、（缺题）

解：（ 1 ）由位移与速度的关系得：

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 + \int_0^t v dt \\
 &= \int_0^t (8 - 8t) dt \\
 &= 8t - 4t^2
 \end{aligned}$$

当 $t = 2\text{s}$ 时， $x = 8 \times 2 - 4 \times 2^2 \text{m} = 0\text{m}$

由速度与加速度的关系得：

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$a = \frac{d}{dt}(8 - 8t) = -8\text{m/s}^2$$

(2) 由功的定义得： $W = Fx$

由(1)中可知， $0 \sim 2\text{s}$ 之间， $x = 0$ ，则 $W = 0$ 。

思考题

思考题 1-1：在棒球运动中，球具有怎样的运动轨迹和规律？棒球手一般通过什么方式来判断和控制球的运动与落点？

参考答案：(1) 球的运动轨迹一般为抛物线，运动轨迹取决于抛物线的高度和水平运动距离，在相同的初速度情况下，竖直分运动的高度越高，其水平运动的距离越短。(2) 棒球手往往可以通过击球瞬间给球施加力的大小和方向，来控制球抛物线运动的轨迹，从而控制球的落点。棒球高手的优势在于能够很好地判断球的运动情况，决定击球的力度和方位。

思考题 1-2：请设想一个可能产生超重的情景，并分析超重的产生原因。

参考答案：发射航天器存在这严重的超重现象，因为航天器在开始加速上升阶段的加速度可以高达 $8g$ ，远远大于重力加速度，其中的宇航员处于了超重状态。失重产生的原因是物体具有了向上运动的加速度，加速度越大，超重越厉害，物体需要承受的压力也越大。设加速度为 a ，则宇航员的示重为

$$G' = m(g + a) > G = mg$$

所以飞船加速时，宇航员处于超重状态。超重对航天员都很大的生理影响，航天员“最大的压力是承受加速度”，“超重耐力”训练要求航天员在承受 8 倍于自身体重的重力条件下，保持正常的呼吸和思维能力，而玩过山车时经历的刺激最多是 2 倍多一点的重力加速度。

思考题 1-3：坐翻滚列车或玩激流勇进时，车身从最高点冲下去时，人瞬间

获得了加速度，打破了人的正常受力状态， 因此人突然感觉异常， 这种异常的感觉让有些人感到刺激， 同时又让有些人感到惊恐。那么，为什么坐后面反而会让人感到更恐惧呢？提示如下： 计算坐在翻滚列车前排和最后一排的人从最高点冲下去时的加速度，由此来判断胆大与胆小的人应该如何反而应该如何选择座位。

参考答案： 由于我们习惯受到重力的作用，而且在竖直方向的加速度为零，但玩翻滚列车或玩激流勇，车身从最高点冲下去时，人瞬间获得了向下加速度，这就打破了人的正常受力状态， 使人突然感觉异常， 这种异常的感觉让有些人感到刺激，同时又让有些人感到惊恐， 这就是人处于失重状态的感觉， 向下的加速度越大，这种感觉越明显。

让我们比较一下坐在过山车最前排和最末排的人在冲下去的瞬间的加速度：
 设翻滚列车有 10 节车厢，每节车厢的总质量为。当第一节列车从轨道最高处冲下去时，忽略列车与轨道之间的摩擦力，第一节车厢的受力情况如图所示。
 设列车此时的加速度为 a ，由牛顿第二定律可得：

$$T' = 9ma$$

$$mg\sin \theta - T = ma$$

而 $T' = T$ ，则

$$a = \frac{1}{10} g \sin \theta$$

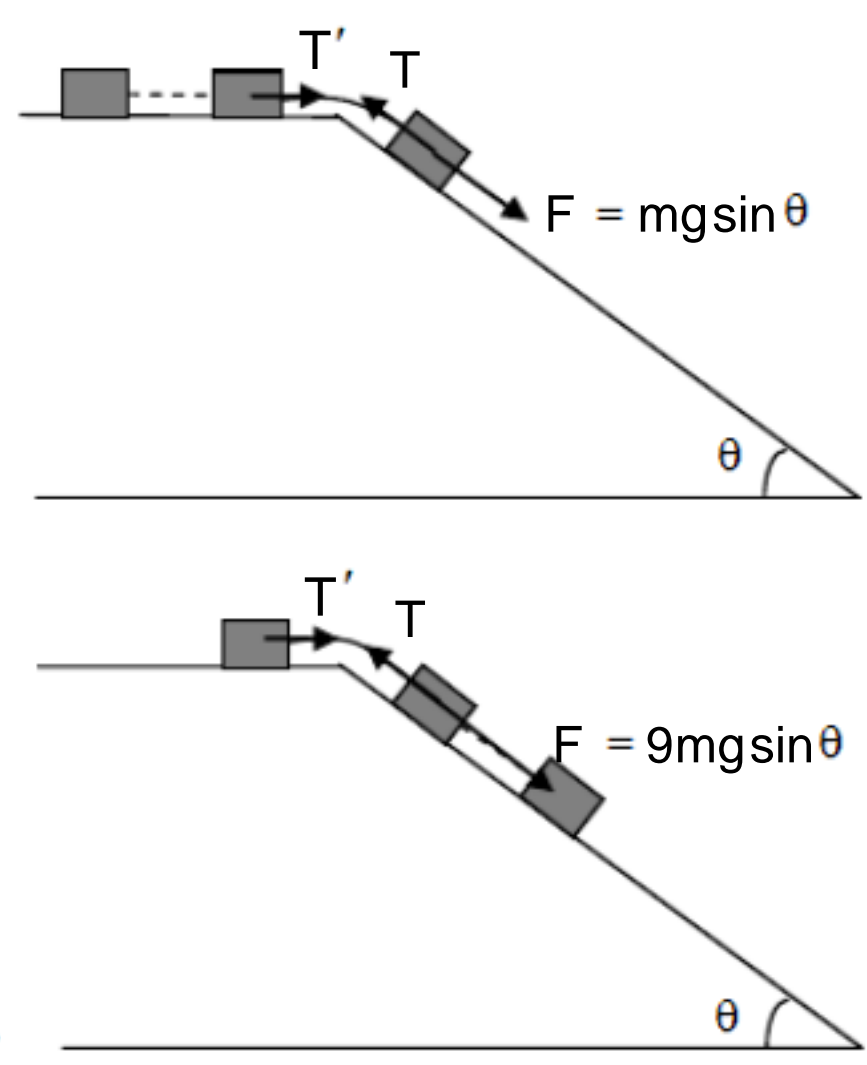
这是第一节车厢向下俯冲时的加速度。

同理，当第十节车厢位于轨道最高处时，第九节车厢的受力情况如图所示，有

$$T' = ma'$$

$$9mg\sin \theta - T = 9ma'$$

则



$$a' = \frac{9}{10} g \sin \theta$$

这是第十节车厢向下俯冲时的加速度。

比较最前排和最末排的人在冲下去的瞬间的加速度可知，坐在最前面的人的加速度最小，最后排的加速度最大，后排的失重感应该比前排强烈。因此，胆大的人应该选择最后一排，而胆小的人反而应该坐最前排。因此几乎所有的人都做了错误的选择。

思考题 1-4：为了提高火箭发射效率，火箭设计师应该采取什么措施？为什么？

参考答案：(1) 如果火箭设计师要提高火箭发射效率，就应该提高火箭上升的加速度，使火箭在上升单位高度后获得更大的速度；同时工程师也应该考虑火箭发射的燃料耗散率，即完成一次火箭发射用尽量少的燃料，这样也可以减轻火箭的重量，有利于提高发射效率。(2) 一方面，根据 1-51 式可知，火箭的推动力与燃料的喷射速度和火箭质量的变化率成正比，即 $F = -v_e \frac{dM}{dt}$ ，可见火箭质量的减少得越快，火箭的加速度越大，则需要单位时间内喷出的燃料越多，所以工程师应该尽量提高火箭燃料的喷射率。

另一方面，根据 1-50 式可知，即 $v - v_0 = v_e \ln \frac{M_0}{M}$ ，火箭燃料的喷射率提高后， $\frac{M_0}{M}$ 的瞬时值大，火箭的瞬时速度 v 增加。此外， v 也与燃料的喷射速率成正比，所以工程师也可以通过提高燃料的喷射速率来提高发射效率。

科学问题的解析

万有引力定律及其应用

万有引力定律在天文学上的应用，有极为重要的意义，海王星就是根据万有引力定律被发现的。在 18 世纪，人们发现太阳系的第七个行星（天王星）的运动轨道，总是与应用万有引力定律计算出来的轨道有一定偏离，于是有人预测，在其轨道外肯定还有一颗未被发现的新星，后来亚当斯和勒维列在预言位置的附近找到了这颗新星——海王星，如图片 1-14 所示。

请分析：

1、如何根据开普勒定律和牛顿运动定律推导出万有引力定律的数学形式？科学家如何根据此数学形式的推知存在“万有引力定律”的？

参考答案：

(1) 对任意一个确定的行星，由 Kepler 第一定律，以太阳（即椭圆的一个焦点）为极点，椭圆的长轴为坐标轴建立极坐标，则行星的轨道方程为

$$r = \frac{p}{1 - e \cos \theta}$$

其中 $p = \frac{b^2}{a}$ 为焦参数， $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ 是离心率， a 和 b 分别是椭圆的半长轴与半短轴。

设在时刻 t 行星与太阳的距离为 $r = r(t)$ ，它们的连线与坐标轴的夹角为 $\theta = \theta(t)$ ，则行星的坐标可表示为 $(r \cos \theta, r \sin \theta)$ 。

记 dA 是半径转过角度 $d\theta$ 所扫过椭圆中扇形的面积，则

$$dA = \frac{1}{2} r^2 d\theta$$

(2) 由 Kepler 第二定律，单位时间内行星扫过相同的面积，故

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} r^2 \omega = \text{常数}$$

$\omega = \frac{d\theta}{dt}$ 为行星运动的角速度。

设行星绕太阳运行一周的时间为 T ，经过时间 T ，半径所扫过的面积恰为整个椭圆的面积 πab ，即

$$\pi ab = \int_0^T \frac{dA}{dt} dt = \frac{1}{2} r^2 \omega T$$

则常数为

$$r^2 \omega = \frac{2\pi ab}{T}$$

两边对 t 求导得到

$$(r^2 \omega)' = 2r \frac{dr}{dt} \omega + r \frac{d\omega}{dt} = 0$$

这里，行星沿半径方向的速度和加速度分别为 $\frac{dr}{dt}$ 和 $\frac{d^2 r}{dt^2}$ ，角加速度为 $\frac{d\omega}{dt}$ ，

则行星在 x 方向和 y 方向上的加速度分量为

$$\frac{d^2(r \cos \theta)}{dt^2} = \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2 \right) \cos \theta$$

$$\frac{d^2(r \sin \theta)}{dt^2} = \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2 \right) \sin \theta$$

设 r 方向上的单位矢量大小为 r_0 , 于是得到加速度的大小为

$$a = \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2 \right) r_0$$

(3) 对椭圆方程 $p = r(1 - e \cos \theta)^{-1}$ 两边对 t 求二阶导数得

$$\frac{\frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2}{r} \cdot p + r \omega^2 = 0$$

所以

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2 = -\frac{(r^2 \omega)^2}{r^2} \cdot \frac{1}{p} = -4\pi^2 \cdot \frac{a^3}{T^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

(4) 由牛顿第二运动定律和 kepler 第三定律, $\frac{a^3}{T^2} = \text{常数}$, 则有

$$F = ma = m \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \omega^2 \right) r_0 = -\frac{4\pi^2 a^3}{T^2} \frac{m}{r^2} r_0$$

令 $G = \frac{4\pi^2 a^3}{MT^2}$, M 是太阳的质量, G 称为引力常数,

$G \approx 6.67 \times 10^{-11} (\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)$ 。则

$$F = -G \frac{Mm}{r^2} r_0$$

(5) 德国科学家早在 16 世纪就得出了行星运动三定律, 但是由于当时缺乏研究变速运动的工具, 直到牛顿发明了微积分, 人们才成功地推导出了行星在一个恒星的椭圆轨道上运动的动力学表达式。

牛顿发现万有引力定律的思路大体如下:

牛顿证明了行星受到的向心力跟物体与焦点的距离的平方成反比, 这一

向心力应该是太阳的引力。

因为地球上得重力也是随着与地心距离的增大按平方反比律而减弱的，
这表明，天体的运动跟地面上物体的运动，有着共同的规律，它们应该本质上应该是同一种力。

牛顿根据他的作用和反作用定律，推论引力作用是相互的。

由此，他指出这种行星或物体受到的向心力，存在于所有具有一定质量的物体之间，于是称之为万有引力，而把该力的数学表达式称为万有引力定律。

2、天王星的运动轨道与应用万有引力定律计算出来的轨道有怎样的偏离？

参考答案：

天王星在 1781 年被确认为是太阳系的第 7 颗行星，之前天文学家曾多次在望远镜中见到过它。1820 年，法国天文学家布瓦德搜集当时的全部观测资料，根据天体力学原理计算天王星的运动轨道时，出现了一个奇怪的现象：他用万有引力定律算出的轨道与 1781 年以后的观测极不相符，其轨道观测值比理论值小。

许多年之后，布瓦德等天文学家将 1750 年以后在英国格林尼治天文台对各个行星所作的全部观测记录，统一地进行了复核。他们发现，除天王星以外，对于别的行星，观测记录与计算结果都能相当准确地符合。因此，他们断定：问题不是出自观测，应该在理论计算方面找原因。

3、根据这一偏差怎样预测新星的位置。

较多的天文学家提出“未知行星”假说，认为在太阳系中还有一颗比天王星更远的行星，它的引力作用使天王星的轨道发生了偏离，这逐渐成为了一个公认的科学假说。

两位年轻的天文学家——英国的亚当斯和法国的勒威耶，根据轨道的偏离情况，假设在天王星轨道以外的地方存在这一颗行星，经过反复多次的修正和计算，基本上确定出有关未知行星的各个参数的数值，并指出了可以发现“未知行星”的天区，很快于 1846 年 9 月 23 日在偏离预言位置不到 1 度的地方这颗星被发现，它被称为海王星。

发现海王星的方法在当时是空前新颖的，后来则成为科学家们的常用方法。

第二章 刚体转动

习题解答

一、分析题

1. 对于一个可绕定轴转动的刚体，若忽略摩擦力的存在，请判断下列说法是否正确。（A）刚体匀速转动的条件是合外力为零；（B）刚体加速转动的条件是合外力不为零；（C）刚体匀速转动的条件是合外力矩为零；（D）刚体加速转动的条件是合外力矩不为零。

答：（C）

根据转动定律 $\vec{M} = J\vec{\alpha}$ 可知：刚体匀速转动的条件是合外力矩为零。

2. 跳水运动员跳水时，为何刚起跳时要立刻把身体缩成一团，而在快入水时候又把身体展开？

答：根据角动量守恒定律，起跳时缩起身体，是为了减小 J ，增大 ω ，能够快速旋转，有利于调整节奏，保证快入水时能直线进入水中；快入水时候把身体展开，是为了增大 J ，减小 ω ，保证入水时能直线进入水中，减小水花，获得高分。

3. 有一个垂直悬挂的细棒可以绕上端点自由旋转，开始时处于垂直静止状态，现有一水平方向快速运动的子弹，与细棒的下端碰撞，如果将细棒和子弹作为一个系统，下列说法是否正确。（A）碰撞瞬间系统所受合外力为零；（B）碰撞瞬间机械能守恒；（C）碰撞瞬间系统动量守恒；（D）碰撞瞬间系统角动量守恒。

答案：（D）

因为碰撞瞬间系统所受合外力矩为零，所以系统角动量守恒。

4. 关于刚体对轴的转动惯量，下列说法是否正确。（A）只与刚体质量有关，与质量的空间分布和轴的位置无关；（B）与刚体的质量和质量的空间分布有关，与轴的位置无关；（C）与刚体的质量、质量的空间分布和轴的位置都有关；（D）只与转轴的位置有关，与刚体的质量和质量的空间分布无关。

答案：（C）

根据 $J = \int_m r^2 dm$ 可知刚体对轴的转动惯量与刚体的质量、质量的空间分布

和轴的位置都有关。

三、综合题

1. 一辆行驶速度为 108km/h 的汽车，车轮的外圈半径为 0.5m ，汽车所有车轮的转动惯量为 $J = 20\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。在 $t = 0$ 时刻汽车开始制动，如果总的制动摩擦力矩为 $M_f = 100\text{N} \cdot \text{m}$ ，请问：(1) 汽车需要多长时间可以停下来？ (2) 从开始制动到停止，汽车行驶了多远距离？

解：(1) 汽车的初始行驶速度为 108km/h 即 30m/s ，汽车的初始角速度为

$$\omega_0 = \frac{v}{r} = \frac{30}{0.5} \text{rad/s} = 60 \text{rad/s}$$

开始制动后角加速度为

$$\alpha = \frac{-M_f}{J} = \frac{-100\text{N} \cdot \text{m}}{20\text{kg} \cdot \text{m}^2} = -5 \text{rad/s}^2$$

则制动需要的时间为

$$t = \frac{-\omega_0}{\alpha} = \frac{0 - 60 \text{rad/s}}{-5 \text{rad/s}^2} = 12 \text{s}$$

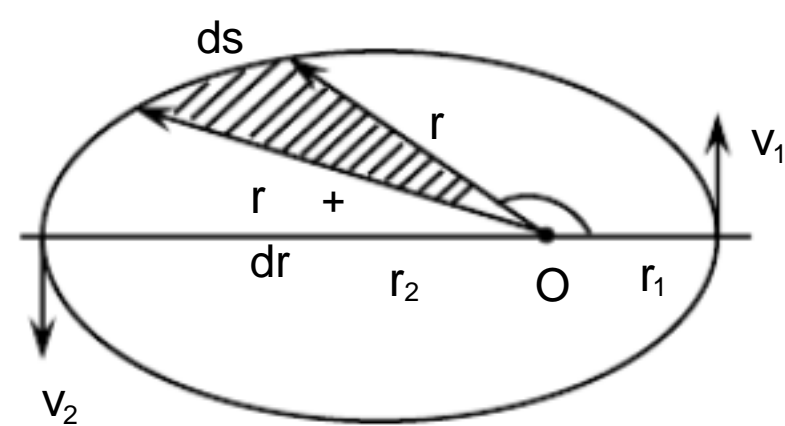
(2) 从开始制动到停止，车轮转过的角度为

$$\theta = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\alpha} = \frac{-(60 \text{rad/s})^2}{2 \times (-5 \text{rad/s}^2)} = 360 \text{rad}$$

则走过的距离为

$$s = r\theta = 0.5\text{m} \times \theta = 180 \text{m}$$

2. 如习题图 2-1 所示，一绕地飞行的卫星数据为：质量为 $m = 143\text{kg}$ ，周期为 $T = 98\text{min}$ ，近地点到地心距离为 $r_1 = 6670\text{km}$ ，远地点到地心距离为 $r_2 = 8890\text{km}$ ，椭圆轨道半长轴为 $b = 7780\text{km}$ ，椭圆轨道半短轴为 $a = 7220\text{km}$ ，试



习题图 2-1

求：卫星的近地点速度和远地点速度 (提示：卫星绕椭圆轨道运动的周期为

$$T = \frac{2\pi ab}{r v})。$$

解：在地心引力作用下，卫星作椭圆轨道运动，且角动量守恒。

设卫星近地速度为 v_1 ，方向与 r_1 垂直；远地速度为 v_2 ，方向与 r_2 垂直，则

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} r_1 v_2 \text{ 为常量}$$

于是

$$s = \frac{1}{2} r_1 v_1 T = \frac{1}{2} r_1 v_2 T$$

近地点速度

$$v_1 = \frac{2s}{r_1 T} = \frac{2 ab}{r_1 T} = \frac{2 \times 3.14 \times 7780 \text{ km} \times 7220 \text{ km}}{6670 \text{ km} \times 98 \times 60 \text{ s}} = 8.99 \text{ km/s}$$

远地点速度

$$v_2 = \frac{2s}{r_2 T} = \frac{2 ab}{r_2 T} = \frac{2 \times 3.14 \times 7780 \text{ km} \times 7220 \text{ km}}{8890 \text{ km} \times 98 \times 60 \text{ s}} = 6.74 \text{ km/s}$$

3. 如习题图 2-2 所示，A 和 B 两飞轮的轴杆在同一中心线上，A 轮的转动惯量为 $J_A = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，B 轮的转动惯量为 $J_B = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。开始时 A 轮的转速为 600 r/min ，B 轮静止。C 为摩擦啮合器。

求（1）两轮啮合后的转速；（2）在啮合过程中，两轮的机械能有何变化？

$$\text{解：} \omega_A = 600 \times 2\pi / 60 \text{ rad/s} = 20 \text{ rad/s}$$

（1）以两飞轮和啮合器作为一系统来考虑，角动量守恒。

$$J_A \omega_A + J_B \omega_B = (J_A + J_B) \omega$$

$$\omega = \frac{J_A \omega_A + J_B \omega_B}{(J_A + J_B)}$$

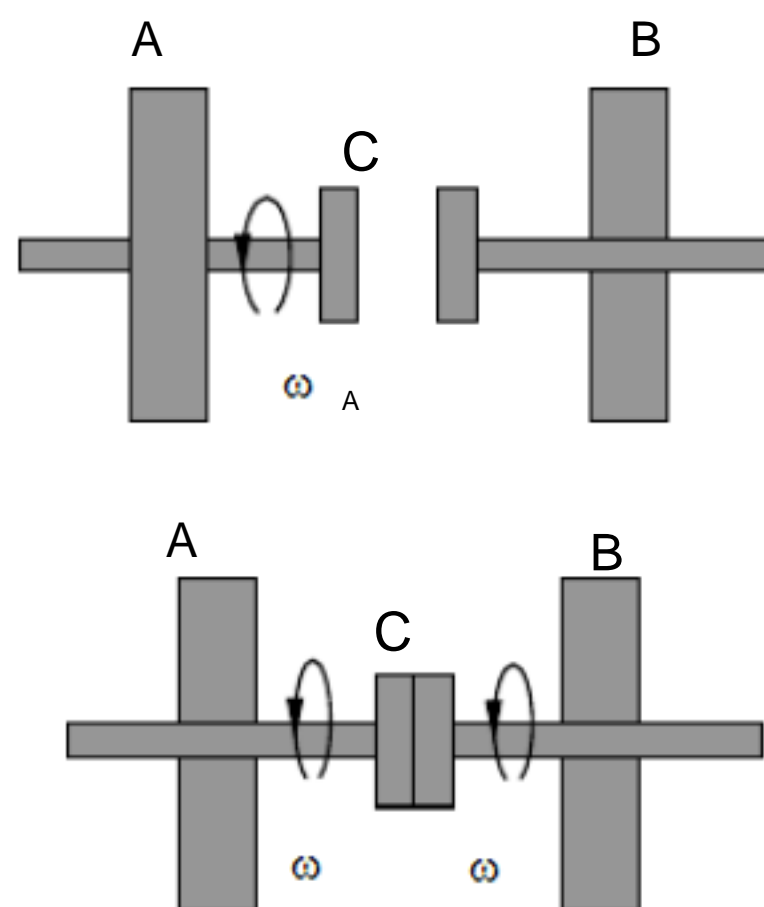
将各值代入得两轮啮合后角速度

$$\omega = \frac{10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times 20 \text{ rad/s}}{10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{20}{3} \text{ rad/s}$$

即转速 $n = 200 \text{ r/min}$

（2）在啮合过程中，摩擦力矩做功，所以机械能不守恒，部分机械能将转化为热量，损失的机械能为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J_A \omega_A^2 + \frac{1}{2} J_B \omega_B^2 - \frac{1}{2} (J_A + J_B) \omega^2$$



$$= \frac{1}{2} \times 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times (20 \text{ rad/s})^2 - \frac{1}{2} (10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{20}{3} \text{ rad/s} \right)^2 = 1.32 \times 10^4 \text{ J}$$

4. 飞机沿水平方向飞行，机头螺旋桨转轴与飞机的飞行方向一致，螺旋桨叶片的长度为 180cm，发动机转速为 2200r/min。试求：（1）桨尖相对于飞机的线速率是多少？（2）若飞机以 216km/h 的速率飞行，计算桨尖相对于地面速度的大小是多少？并定性说明桨尖的运动轨迹。

解：(1) 桨尖相对于飞机的线速率：

$$v_1 = R \omega = \frac{2 \times 2200}{60} \times 1.8 \text{ m/s} = 414.48 \text{ m/s}$$

(2) 因为桨尖相对于飞机的线速度与飞机前行的速度互相垂直，飞机的前行速度为 216km/h 即 60m/s，所以桨尖相对于地面速度的大小：

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 60^2} \text{ m/s} = 418.80 \text{ m/s}$$

由于桨尖同时参与两个运动：匀速直线运动和匀速圆周运动。故桨尖轨迹应是一个圆柱螺旋线。

5. 一转动飞轮的半径为 $r = 0.5 \text{ m}$ ，转动惯量为 $J = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，转速为 $\omega = 52 \text{ rad/s}$ ，两制动闸对轮的压力都为 325N，闸瓦与轮缘间的摩擦系数为 $\mu = 0.4$ 。试求：从开始制动到静止，一共需要用多少时间？

解：因为制动总的力矩为：

$$M_f = 2\mu N r = 2 \times 0.4 \times 325 \text{ N} \times 0.5 \text{ m} = 130 \text{ N} \cdot \text{m}$$

则角加速度为

$$\alpha = \frac{-M_f}{J} = \frac{-130 \text{ N} \cdot \text{m}}{10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = -13 \text{ rad/s}^2$$

则制动需要的时间为

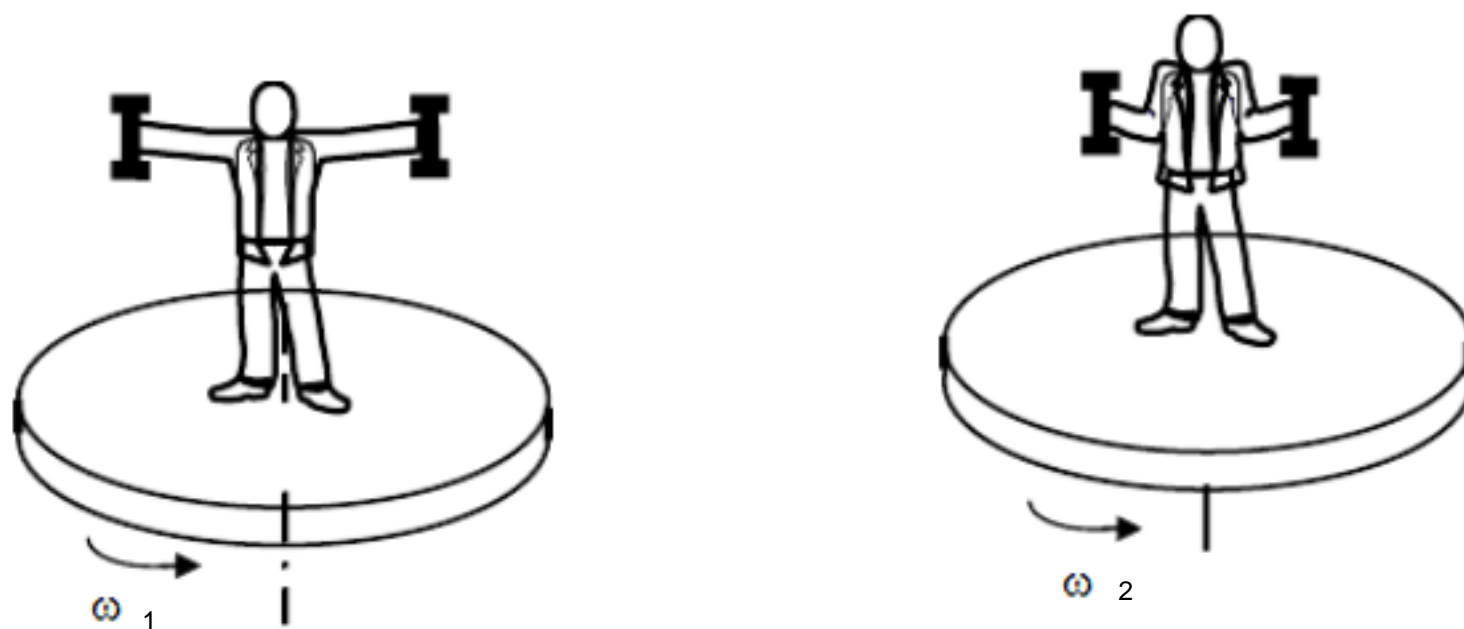
$$t = \frac{\omega_0}{\alpha} = \frac{0 - 52 \text{ rad/s}}{-13 \text{ rad/s}^2} = 4 \text{ s}$$

即开始制动到静止需要 4s 时间。

6. 如习题图 2-3 所示，一人站在自由转动的圆盘中心（不计摩擦），人与转盘的转动惯量 $J_0 = 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，人手臂伸直后的长度为 1m（人的手掌与人体中心

轴线距离), 手臂完全收拢时长度为 0.2m 。人的每只手各抓有一个质量 $m = 5\text{kg}$ 的哑铃。试问：(1) 在人伸缩手臂的过程中，人、哑铃与转盘组成的系统的角动量是否守恒？为什么？(2) 如果人伸直手臂时，系统转动角速度 $\omega_1 = 3\text{rad/s}$ ，人收拢手臂时的角速度 ω_2 是多少？(3) 系统在转动的过程中，机械能是否守恒？为什么？

解：(1) 整个过程合外力矩为 0 ，角动量守恒。



$$(2) J_1 = J_0 + 2ml_1^2 = 100\text{kg} \cdot \text{m}^2 + 2 \times 5\text{kg} \times (1\text{m})^2 = 110\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_2 = J_0 + 2ml_2^2 = 100\text{kg} \cdot \text{m}^2 + 2 \times 5\text{kg} \times (0.2\text{m})^2 = 100.4\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

因为 $J_1\omega_1 = J_2\omega_2$

所以
$$\omega_2 = \frac{J_1\omega_1}{J_2} = \frac{110\text{kg} \cdot \text{m}^2 \times 3\text{rad/s}}{100.4\text{kg} \cdot \text{m}^2} = 3.29\text{rad/s}$$

(3) 在此过程中机械能不守恒，因为人收臂时做功。

思考题

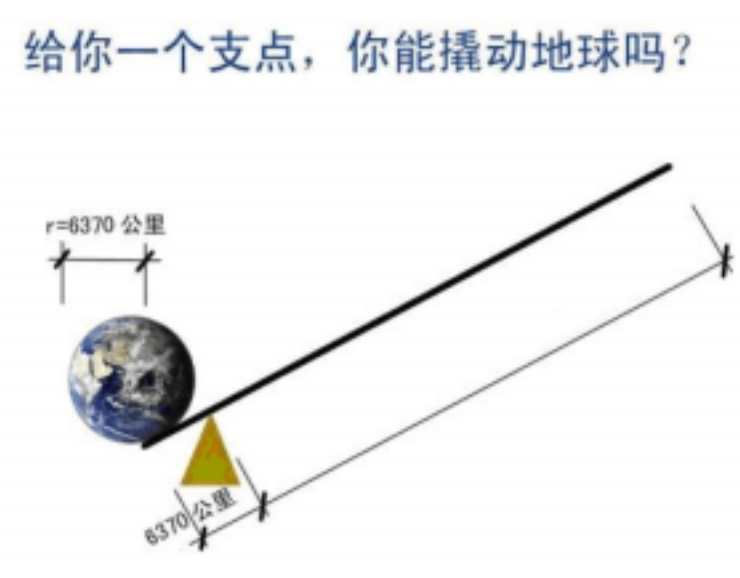
思考题 2-1 石磨一般包含上下两个石头磨盘，上面磨盘上装有一横杆作为把手，当人用力推动把手时，上面磨盘就会转动，通过两个磨盘之间的摩擦来研磨食物。请问：人们为什么要装一个横杆而不是直接推动磨盘？人在什么位置推把手才能使磨盘转动得快？人在什么位置推把手更省力？

参考答案：直接推动磨盘，因为推动磨盘的力臂太短，会很费力；在磨盘上装一横杆增加了力臂，推动磨盘就会很省力；推把手时，手离磨盘越近，因为线速度不变，半径减小，角速度增大，磨盘转动越迅速；但这时因为力臂太短感觉

费力；要想省力，应在把手的末端推把手，因为作用力相同时，这时力矩最大。

思考题 2-2 地球的质量为 $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，假定一个质量为 100 kg 的人想用一根长杆借助一个支点撬起地球， 支点的位置在哪儿最好？根据支点位置估算撬起地球的杆有多长？

参考答案 :本题可参考下图，从理论上讲，撬动地球的受力点与支点的距离越小越好， 距离越小，人作用力的力矩越大。 我们如果取支点位置和地球的受力点的距离恰好是地球的半径，即 6370 公里 ，则一个质量为 100 kg 的人要撬动地球需要的杆的长度为 $381 \times 10^{23} \text{ km}$ ，此杆的长度远远大于目前人类探测的宇宙大小（这种撬动实际上是不可能实现的，只是用来说明力矩的作用）。

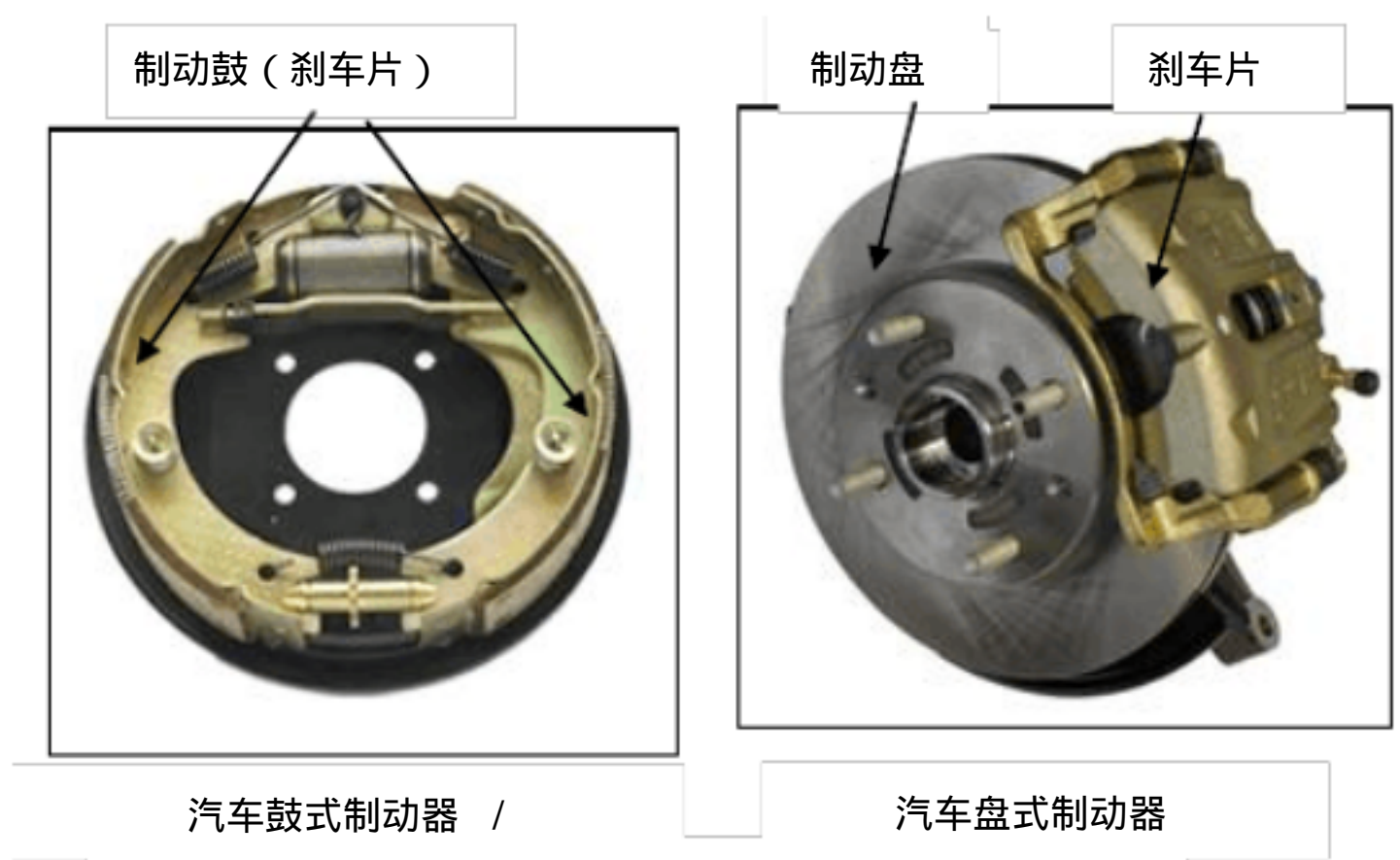


工程问题解析

汽车制动器

汽车制动器是指产生阻碍车辆运动或运动趋势的力（制动力）的部件，其中也包括辅助制动系统中的控制装置。目前，汽车所用的制动器几乎都是摩擦式的，主要分为鼓式和盘式两大类（如图片 2-7 所示）。

鼓式制动器摩擦元件为制动鼓，其工作表面为圆柱面。制动鼓（刹车片）



图片 2-7 汽车制动装置

位于制动轮内侧，在刹车的时候制动鼓向外张开，摩擦制动轮的内侧，达到刹车的目的。盘式制动器的摩擦元件为旋转的制动盘和固定的制动钳，制动盘固定在车轮上随车轮转动，制动钳的两个刹车片分别装在制动钳的内部两侧。在汽车刹车时，制动钳被液压装置推动后，钳住旋转中的制动盘，迫使车轮停下来。

汽车的这两种制动方式虽然不同，但在物理上都是利用摩擦力矩来制动的。

请分析：

1. 如果把车轮看作绕车轴转动的刚体，汽车是怎样利用摩擦力矩的？
2. 为什么汽车制动器的刹车片要安装在制动盘或车轮的边缘？
3. 工程师可以采用哪些方法来改进汽车的制动器？

参考答案：1. 在刹车的时候，车轮边缘的制动轮产生摩擦力，进而产生摩擦力矩，使得车轮转动越来越慢。

2. 同样大小的摩擦力，在车轮边缘的摩擦力矩最大，可以尽快地使车轮减速，提高摩擦力的利用效率。

3. 鼓式刹车盘和盘式刹车盘都可以发挥摩擦力矩的作用使得车轮减速，但在减速的过程中，要产生大量的热量，一方面会使刹车片的寿命缩小，另一方面发热的刹车片影响制动效果，工程师在改进汽车制动器的时候，一方面可以寻找更耐热的材料，另一方面在不影响制动效果的前提下改进散热方面的设计。

第三章 相对论

习题解答

一、分析题

1. 银河系的直径大致为 10 万光年，1 光年是光在 1 年之内走过的距离。如果有人乘坐一艘以光速飞行的宇宙飞船横穿银河系，他将在飞船上度过多少时间？为什么？

答：时间为零，因为根据狭义相对论长度 $l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ 可知，对乘坐速度为

光速的宇宙飞船的人，银河系的直径等于零。

2. 在地球上观察到一束光在 t_1 时刻发出, 另一束光在 t_2 时刻发出, 那么地球上的计时器显示这两束光发出的时间差是 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。假定光束本身可以计时, 是不是第二束光认为自己与第一束光发出的时间差也是 $\Delta t = t_2 - t_1$? 为什么?

答: 时间间隔为零, 因为对于光线来讲, 经历的时间永远为零。

3. 如果我们乘坐一艘宇宙飞船从地球旁经过, 飞船相对于地球的速度为光速的一半, 那么我们看到的地球还是圆形吗? 如果宇宙飞船的速度等于光速, 我们看到的地球是什么形状? 为什么?

答: 飞行速度为二分之一光速时地球是椭圆, 因为前进方向长度收缩; 宇宙飞船的速度等于光速时地球是一个没有厚度的圆盘, 因为前进方向没有长度了。

4. 一个物体在持续的外力作用下, 它的速度是不是可以无限制地增加? 为什么?

答: 不会无限增加, 因为随着速度增加, 物体质量即惯性就越来越大, 速度极限是光速, 但永远达不到光速。

二、综合题

1. 一艘宇宙飞船以 $v = 0.6c$ 的速度从地球上静止的观察者面前飞过, 假设飞船上安装有一个边长为 1m 的立方体, 则该观察者看到的物体形状是什么? 边长为多少?

解: 地球上的观察者看到这个物体的形状是长方体, 在前进方向看到的长度为

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1\text{m} \times \sqrt{1 - \frac{(0.6c)^2}{c^2}} = 0.8\text{m}$$

在其他方向, 长度仍为 1m 。

2. 如果通过外力作用使质子的速度从 $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{m/s}$ 增加到 $v_2 = 2.0 \times 10^8 \text{m/s}$, 外力对它作的功是多少? (质子静止质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{kg}$)

解: 质子速度为 $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{m/s}$ 时总能量为:

$$E_1 = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{\sqrt{1 - \frac{(1.0 \times 10^7 \text{ m/s})^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}} = 1.502 \times 10^{-10} \text{ J}$$

质子速度为 $v_2 = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 时总能量为：

$$E_2 = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{\sqrt{1 - \frac{(2.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}} = 2.016 \times 10^{-10} \text{ J}$$

则施加外力使质子的速度从 $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 增加到 $v_2 = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 外力必须对它作的功为

$$W = E_2 - E_1 = 2.016 \times 10^{-10} \text{ J} - 1.502 \times 10^{-10} \text{ J} = 5.14 \times 10^{-11} \text{ J}$$

3. (答案有差异) 半人马星座 α 星是距离太阳系最近的恒星，它到地球的距离是 $4.3 \times 10^{16} \text{ m}$ 。假设一宇宙飞船从地球飞到 α 星，飞船相对于地球的速度为 $v = 0.99c$ 。以地球上的时钟计算，飞船需要用多少年时间才能到达该星？以飞船上的时钟计算，飞船又需多少年时间？

解：以地球上的时钟计算，需要的时间为

$$t_1 = \frac{l}{v} = \frac{4.3 \times 10^{16} \text{ m}}{0.99 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.44781145 \times 10^8 \text{ s} = 4.59098 \text{ 年} \text{ 即 } 1676 \text{ 天}$$

如果以飞船为参考系，地球到 α 星的距离变为

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 4.3 \times 10^{16} \text{ m} \times \sqrt{1 - \frac{(0.99c)^2}{c^2}} = 6.066 \times 10^{15} \text{ m}$$

则以飞船上的时钟计算，需要的时间为

$$t_1 = \frac{6.066 \times 10^{15} \text{ m}}{0.99 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.04242424 \times 10^7 \text{ s} = 236.3 \text{ 天} = 0.647 \text{ 年}$$

思考题

思考题 3-1：在物理学发展的过程中，为了纪念物理学家们的贡献，往往以他们的名字来命名他们提出的理论或获得的结论。但是，为什么狭义相对论中的时空坐标变换不称为爱因斯坦变换，而是洛伦兹变换呢？

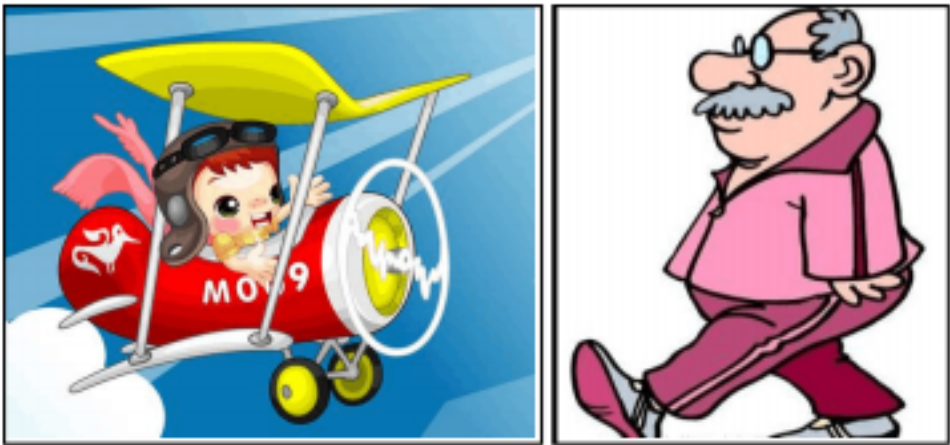
参考答案：虽然狭义相对论的根本理论是爱因斯坦全面提出来的，但是在狭义相对论出现之前，经典力学无法解释迈克尔孙实验结果，洛伦兹提出了一套坐

标变换公式，可以很好地解释迈克尔孙实验结果，但洛仑兹只是站在经典力学修修补补的角度，没有意识到这个变换公式所蕴含的深刻的物理实质。在爱因斯坦提出狭义相对论之后，发现洛仑兹的坐标变换公式是狭义相对论的自然推论，后人为了纪念洛仑兹，就将狭义相对论的坐标变换公式称为洛仑兹变换。

思考题 3-2 按照狭义相对论的结果，一名身高 1.8m 的胖人以接近光速做水平运动时，地面的观察者看到他的身材和身高将会怎样变化？人们是否可以利用这种变化呢？

参考答案：身高 1.8m 的胖人以接近光速作水平运动时，地面上的人看到他的身高没有变化，但身体将变得非常苗条；现代社会的人类很欣赏苗条的身材，但相对论引起的身体苗条，人们无法利用，因为对于运动的这个人自己来讲，他并没有变得苗条。

思考题 3-3 如果将一对双胞胎兄弟中的一个送去做星际旅行，他乘坐的飞船以近光速运行，并在地球时间 60 年后返回地球，如图片 3-6 所示。请问：双胞胎兄弟的年龄是一样吗？会出现一个是老人一个还是孩子的情况吗？为什么？



图示 3-6 双胞胎佯谬

参考答案：双胞胎再次相遇以后，他们的年龄将不一样；会出现一个是老人另一个是孩子的情况；因为根据相对论的结论，高速运动的坐标系中的时钟会变慢，60 年后返回地球的这个兄弟会感觉他经历的时间远远小于 60 年。

科学问题的解析

核能与核武器

核武器是指利用核裂变或聚变反应释放的巨大能量而产生爆炸作用，并具有大规模杀伤破坏力的武器的总称。例如原子弹、氢弹、中子弹等，如图片 3-12 所示。

美国于 1945 年 8 月 6 日和 9 日先后在日本的广岛和长崎投下了两颗原子弹，显示了原子弹空前的杀伤力和破坏力。现在核武器杀伤力



图片 3-12 原子弹爆炸

更强，一旦发生战争，全球的各种核武器足以毁灭整个世界，因此这样的“核战争”中没有赢家，只要自我毁灭。

请分析：

1. 爱因斯坦发现了质能关系，但他绝对没想到核能会被用来做成原子弹。

如何客观地看待这一事实？

2. 面对核武器可能给人类的巨大伤害，人们应该做些什么？

3. 为了更好地、合理地利用核能，人类可以开辟哪些新的途径？

参考答案：1. 科学本无所谓“好与坏”、“对与错”，但科学研究的结果却让人们不断地挑战自己的是非观念，人们只有客观、科学地去审视这个世界上发生的一切，知道“什么可为”而“什么不可为”，合理而有效的利用科学为人类造福。

2. 在当今社会，其实核武器最大的作用已经不是作为战争的利器，而是作为一个威慑他国的战略性武器，不能轻易使用。人类最好停止核武器的研制，建立一个和平的世界。

3. 核能的和平利用：核能发电。

第四章 气体动理论

习题解答

一、分析题：

1. 根据气体压强公式分析：为什么不能将密封瓶罐装的食物和带壳的生鸡蛋放在微波炉中加热？

答：加热封闭罐装食物或带壳生鸡蛋后，温度升高，气体分子动能增加，会导致内部压强过大而发生爆炸。

2. 假设空气中水分子的速率类似麦克斯韦速率分布律，试分析夏季多雨的原因？

答：当温度升高后，水分子速率分布曲线的峰值右移，平均速度增大，导致能够逃逸的水分子增多，从而容易形成云和雨。

二、综合题

1. 最好的真空实验室具有 $1.00 \times 10^{-13} \text{ Pa}$ 的压强。当温度为 25°C 时，在这样的实验室中每立方米有多少气体分子？

解：根据理想气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_k$$

理想气体温度公式

$$\bar{\epsilon}_k = \frac{3}{2} kT$$

可得

$$p = nkT$$

因此实验室中每立方米气体分子个数为

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.0 \times 10^{-13}}{1.38 \times 10^{-23} \times (25 + 273.15)} = 2.43 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$$

2. 汽车轮胎体积为 $1.60 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，当温度为 0°C 时，轮胎内空气的压强为 $2.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ ；当温度上升至 25°C 时，轮胎的体积增加到 $1.65 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，此时轮胎内空气的压强为多少？

解：根据玻—马定律 $pV = C$ 和查理定律 $\frac{p}{T} = C$ 可得

$$\frac{pV}{T} = C$$

(设 0°C 气体压强为 p_0 、体积为 V_0 、温度为 T_0 ， 25°C 度时压强为 p_1 、体积为 V_1 ，温度为 T_1)

$$\text{则：} \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$$

$$\begin{aligned} \text{即：} p_1 &= \frac{p_0 V_0 T_1}{T_0 V_1} = \frac{2.6 \times 10^5 \times 1.6 \times (273.15 + 25)}{273.15 \times 1.65 \times 10^{-2}} \text{ Pa} \\ &= 2.75 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

3. 金星大气层顶部附近的温度是 240 K ，(1) 试计算金星大气层顶部氢气和二氧化碳的方均根速率；(2) 研究发现，当气体分子方均根速率超过地球上逃逸速度的 $1/6$ 时，气体将逃逸出大气层并进入外层空间，如果金星上的逃逸速度

是 10.3km/s ，那么氢气和二氧化碳气体能逃逸出来吗？

解（1）氢气分子和二氧化碳分子的方均根速率为

氢气：

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{\text{H}_2}}} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 240}{2 \times 10^{-3}}} \text{m/s} = 1.72 \text{km/s}$$

二氧化碳：

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{\text{CO}_2}}} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 240}{44 \times 10^{-3}}} \text{m/s} = 0.35 \text{km/s}$$

（2）金星上逃逸速度的 1/6 是 1.72km/s ，因此氢气可以逃出，而二氧化碳不能逃逸出金星。

科学问题的解析

礁湖星云的压强

礁湖星云是宇宙中位于人马座的发射星云（图片 4-5）。发射星云是气体星云的一种，它们形状不规则，往往没有明晰的边界，又称弥漫发射星云。在这些星云中间通常有一个或一团高温恒星。来自高温恒星的紫外辐射使星云内的气体激发，产生光致电离而形成星云的发射光谱，所以被称为发射星云。礁湖星云距离地球 5000 光年，直径约为 45 光年。在由 110 个明亮天体组成的梅西叶星表中名列第 8，简称 M8，在星云和星团的新总表中排名 6523，又称 NGC6523。



图片 4-5 礁湖星云

礁湖星云的主要成分是氢气，星云内部的高温恒星，使整个礁湖星云的温度高达 7500K，恒星发出的紫外线使星云内的氢气电离，整个星云发出耀眼的光芒。此外，礁湖星云非常的稀薄，每立方厘米内只有约 80 个分子。

请分析：

1. 根据气体压强的计算方法， 礁湖星云中气体的压强是多少？该压强对星云意味着什么？

2. 在科幻影片中常出现飞船通过某个星云的场景， 人们看见飞船剧烈颠簸。假设飞船穿过的是礁湖星云，星云气体的气流能引起的飞船颠簸吗？并阐明原因。

参考答案：1. 根据气体压强的计算

$$P = nkT = \frac{80}{1 \times 10^{-6}} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 7500 \text{ Pa} = 8.28 \times 10^{-12} \text{ Pa}$$

说明星云里的物质密度是很低的， 若以地球上的标准来衡量的话， 可视为真空。

2. 不会出现。因为压强太低，不足以引起飞船颠簸。

第五章 热力学基础

习题解答

一、分析题：

1. 在体积不变的情况下，一定量理想气体的温度从 25°C 升高到 50°C ，那么气体压强是否也增加到原先的 2 倍？为什么？

答：否。根据式 $pV = \mu RT$ ， T 为绝对温度， 25 和 50 的绝对温度为 29815K 和 32315K ，因此在体积不变的情况下气体压强并未增加到原来的 2 倍。

2. 设分子只有转动，一定量的双原子分子的理想气体在等体过程和等压过程中都以热量形式损失了能量 Q ，在哪一个过程中气体内能减少的更多？

答：等体过程。在等体过程中损失的能量 Q 全部来自于内能的减少，而在等压过程中损失的能量 Q 一部分来自于内能减少，另一部分来自于气体对外做的负功，因此在等体过程中内能减少更多。

3. 是否可以制成一部热机，它能在水的沸点和冰点间工作，且效率达 70%，为什么？

答：不能。在水的沸点和冰点间工作的卡诺热机的效率为 26.8%，因此，根

据卡诺定理，在水的沸点和冰点间工作的热机效率达不到 70%。

4. 把封闭在一个绝热气缸中的气体，压缩到它体积的一半。在这个过程中，气体的熵是增加、减小还是不变？

答：不变。根据熵的定义，在封闭的绝热气缸中气体体积减小的过程中吸收的热量为 0，因此气体的熵不变。

5. 如果你将厨房的冰箱门打开几个小时，厨房的温度是升高、降低还是不变？假设厨房是封闭的。

答：升高。在封闭的厨房中冰箱消耗的电能以热量的形式传递到厨房中，所以厨房的温度升高。

三、综合题

1. 1mol 理想气体经历一个等温膨胀过程，请用初始状态和末状态的体积及温度来表示气体吸收的热量。

解：设初状态体积为 V_1 ，温度为 T ，末状态体积为 V_2 ，温度为 T 。
根据热力学第一定律

$$(dQ)_T = dW = pdV$$

由式 (5-1) 可得气体吸收的热量为

$$Q_T = W = \int_{V_1}^{V_2} RT \frac{dV}{V} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

2. 当理想气体吸收 30J 的热量时，气体的体积从 40cm^3 变化到 140cm^3 ，压强保持在 1 个大气压不变。试求气体内能的改变量。

解：根据热力学第一定律在等压过程中

$$\Delta E = Q - P\Delta V = 30\text{J} - 1 \times 10^5 \times 100 \times 10^{-6} \text{J} = 20\text{J}$$

3. 在恒定压强下，初始温度为 25 时，加热 1mol 氮气，使其体积增加到原来的两倍，气体吸收了多少热量（分子只要转动）？

解：根据物态方程 $pV = \mu RT$ 可得

$$p = \frac{\mu RT}{V} \quad (1)$$

$$T = \frac{pV}{\mu R} \quad (2)$$

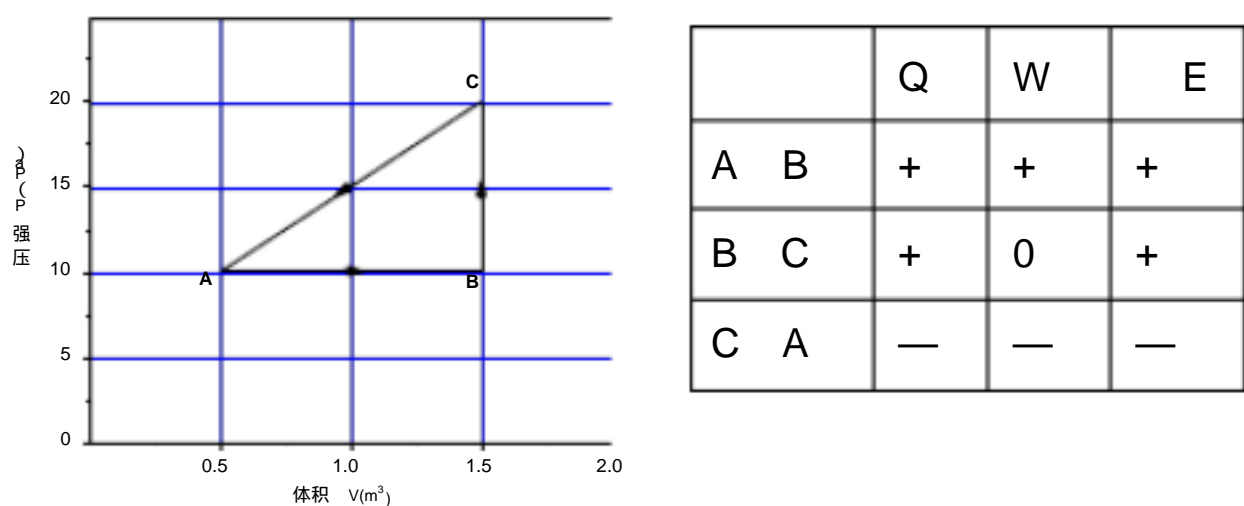
根据热力学第一定律可得

Q = E + p V = \frac{i}{2} R T + p V (3)

将 (1),(2) 代入 (3) 式可得

Q = 2 \mu R T = 1 \times 8.31 \times (25 + 273.15) J = 4.95 \times 10^3 J

4 . 如习题图 5-1(a)所示 , 一个热力学系统从初态 A 变化到另一状态 B , 再经过状态 C 又回到状态 A。(1) 填写习题图 5-1(b)表中每一个热力学量的 + 或 - ; (2) 计算整个循环过程中系统作的功。



解: (1) AB过程 : 此过程为等压过程气体体积增加 , 气体对外做正功 $W > 0$, 温度升高 , 内能增加 $\Delta E > 0$, 故根据热力学第一定律气体吸收 $Q > 0$ 。

BC过程 : 此过程为等体积过程 , 压强增加 , 温度升高 , 气体对外做功为 0 , 内能增加即 $E > 0$, 故根据热力学第一定律吸收热量 $Q > 0$ 。

CA 过程 : 在此过程中气体体积减小 , 对外做负功 $W < 0$, 温度降低 $E < 0$, 故根据热力学第一定律气体放出热量 $Q < 0$ 。

(2) 整个循环过程中对系统外做的净功应等于循环曲线所包围的面积

W = -\frac{1}{2} (p_C - p_A) (V_B - V_A) = -\frac{1}{2} \times 10 \times 1 J = -5 J

5 . 一卡诺热机在温度为 1000K 和 300K 两个热源之间工作 , 如果 (1) 将高温热源 T_1 提高到 1100K ; (2) 将低温热源温度降低到 $T_2 = 200K$, 求两种方案下的热机的效率 , 并分析在实际应用中哪一种方案更好。

解 : 根据卡诺热机的循环效率 , 可得此热机的效率 :

\eta_0 = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{1000} = 70%

(1) 若高温热源提高到 1100K , 热机效率为 :

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{300}{1100} = 73\%$$

(2) 若将低温热源降低到 200K，热机的效率为

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{200}{1000} = 80\%$$

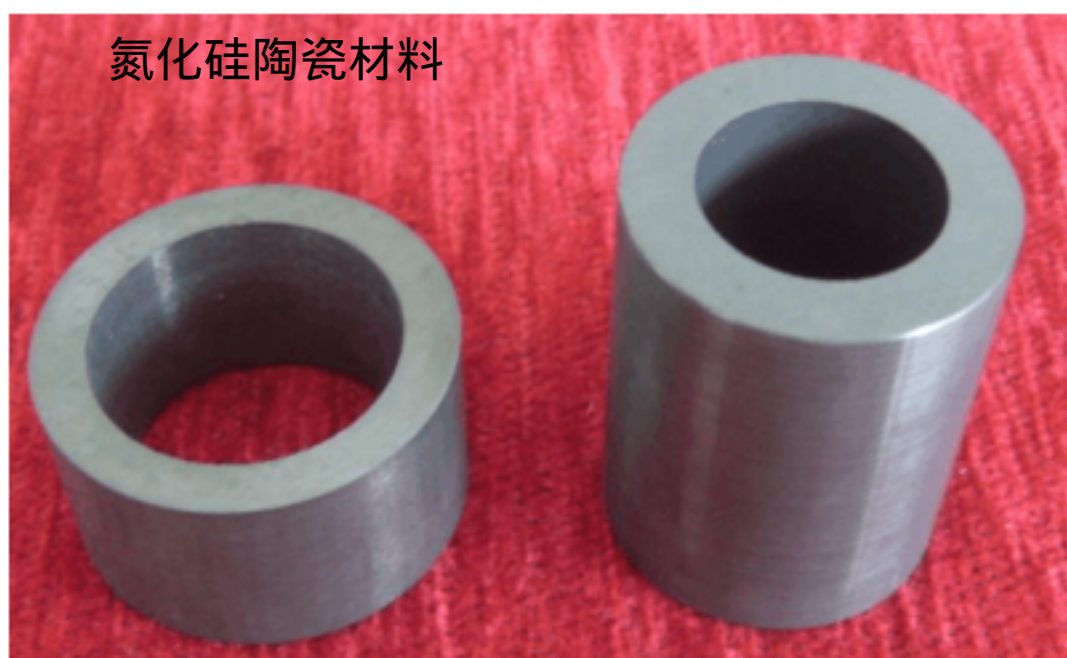
从上述结果中可以看出 $\eta_2 > \eta_1$ ，因此在实际应用中采取第二种方法好。

工程问题解析

陶瓷内燃机

内燃机是将液体或气体燃料与空气混合后，直接输入汽缸内部的高压燃烧室燃烧后产生动力的装置。内燃机具有体积小、质量小、热效率高、启动性能好的特点。在飞机、机车、船舶、汽车、拖拉机和工程机械等中有着广泛的应用。

对于内燃机而言，高的热机效率，是其关键性的指标。为了提高其效率，有人将陶瓷材料用于制作内燃机的外壳。如图片 5-10 所示。因为陶瓷材料（如氮化硅和碳化硅陶瓷）具有较高的



氮化硅陶瓷材料

图片 5-10 氮化硅陶瓷材料

可以将工作温度提高到 1300°C ，

比目前通用的内燃机的工作温度高出 300°C 左右，使发动机效率提高 30% 左右。

因此，用陶瓷材料来制造发动机已成为当前世界各国汽车行业重点研发的目标。

请分析：

1. 陶瓷材料用于发动机为什么可以提高工作温度？

2. 假设发动机的工作过程是由两个等体过程和两个绝热过程组成的循环，试计算陶瓷内燃机和普通镍基耐热合金制成的内燃机的效率，并对比其结果？

参考答案：1. 陶瓷材料的热传导性比金属材料低，具有良好的绝热性能，使发动机的热量不易散发，从而提高工作温度。

2. 由 $\eta = 1 - \frac{T_{\text{低}}}{T_{\text{高}}}$ (低温热源为 27°C) 可知 $\eta_{\text{陶瓷}} = 1 - \frac{T_{\text{低}}}{T_{\text{高}}} = 1 - \frac{27 + 273}{1300 + 273} = 80.9\%$

和 $\eta_{\text{普通}} = 1 - \frac{T_{\text{低}}}{T_{\text{高}}} = 1 - \frac{27 + 273}{1000 + 273} = 76.4\%$ 。相比较而言陶瓷发动机的效率高于普通

镍基耐热合金制成的内燃机的效率。

第六章 量子物理

习题解答

一、分析题：

1. 请判断下面关于光电效应的说法的正误。 (A) 入射光强度越大，截止频率越高；(B) 靶材料的逸出功越大，截止频率越高；(C) 入射光的频率越高，被打出电子的最大动能就越大。

答：(A) 错误；(B) 正确；(C) 正确。

根据光电效应方程 $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$ ，可知截止频率 $\nu_0 = \frac{W}{h}$ 与入射光强度无关；靶材料的逸出功越大，截止频率越高；入射光的频率越高，被打出电子的最大动能就越大。

2. 用一定频率的光照射金属板，哪一项决定电子是否逸出。 (A) 光的强度；(B) 光照时间；(C) 板的面积；(D) 板的材料。

答：(D)

根据光电效应方程 $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$ ，可知截止频率 $\nu_0 = \frac{W}{h}$ 只与板的材料有关。

3. 光子 A 具有的能量为光子 B 的两倍，试问：(1) 光子 A 的动量是光子 B 动量的多少倍；(2) 光子 A 的波长是光子 B 波长的多少倍。

答：光子所具有的能量 $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ，光子所具有的动量为

$p = mc = \frac{hc}{\lambda}$ 。由于 $E_A = 2E_B$ ，故光子 A 的动量是光子 B 的动量的 2 倍，光子

A 的波长是光子 B 的波长的 $1/2$ 。

4. 电子和质子具有相同的动能，请问哪个的德布罗意波长较大？

答：电子和质子具有相同的动能 $E_{k1} = E_{k2}$ ，故电子和质子的动量为

$$p_1 = \sqrt{2m_1 E_{k1}}, \quad p_2 = \sqrt{2m_2 E_{k2}}。$$

又由于物质的德布罗意波 $\lambda = \frac{h}{p}$ ，且 $p_2 > p_1$ ，所以电子波长大于质子

波长。

二、综合题

1. 钾的逸出功为 2.25eV ，请问：可以使钾产生光电效应的入射光的最大波长。

解：根据光电效应的截止频率 $\nu_0 = \frac{W}{h}$ ，可得

$$W = h\nu_0 = h\frac{c}{\lambda}$$

因此可以使钾产生光电效应的入射光的最大波长为

$$\lambda = \frac{hc}{W} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{2.25 \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{m} = 5.525 \times 10^{-7} \text{m} = 552.5 \text{nm}$$

2. 在普通电视机内，电子被电势差为 30.0kV 的电场加速，请计算这种电子的德布罗意波长。

解：电子被加速后所具有的动能为：

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = 30.0 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J} = 4.8 \times 10^{-15} \text{J}$$

电子的德布罗意波长：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_k}} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 4.8 \times 10^{-15}}} \text{m} = 7.2 \times 10^{-12} \text{m}$$

3. 一辆 1200kg 的汽车，通过精确测量测得，其质心沿某直线方向的位置不确定度为 $1\mu\text{m}$ 。（1）请计算汽车沿某直线方向速度的不确定度；（2）不确定关系是不是使人、汽车、飞机等普通物体的位置和速度不能被同时测量呢？为什么？

解：（1）由（6-11）可得电子动量不确定度为：

$$P_x \geq \frac{h}{x} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1 \times 10^{-6}} \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s} = 6.63 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}$$

故汽车速度不确定度为：

$$v_x = \frac{P_x}{m} = 5.5 \times 10^{-31} \text{ m/s}$$

（2）不是。人、汽车、飞机等普通物体为宏观物体，而对于宏观物体的位置和速度的不确定度可以忽略。

工程问题解析

太阳能电池

太阳能是一种清洁的可再生能源，主要利用太阳的辐射能量，是未来人类所需能源的主要来源之一。太阳能电池是通过光电效应或者光化学效应把太阳能转化成电能的装置，如图片 6- 20 所示。太阳能电池发电是一种可再生的环保发电方式，发电过程中不会产生二氧化碳等温室气体，不会对环境造成污染。目



图片 6- 20 太阳能电池

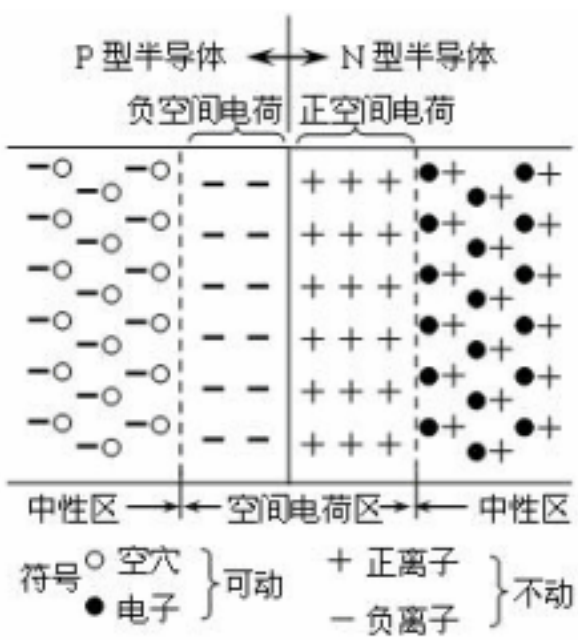


图 6-5 pn 结内部结构图

前，常用太

阳能电池是以光电效应为工作原理，它的基本结构是半导体的 pn 结，其内部结构如图 6- 5 所示。太阳光照在半导体 pn 结上时，光子激发出中性区的电子，大大增加了电子 -空穴对，在 pn 结电场的作用下，空穴由 n 区流向 p 区，电子由 p 区流向 n 区，形成电流。这就是光电效应太阳能电池的工作原理。

请分析：

- 1．太阳能电池产生电能的条件。
- 2．提高太阳能电池光电转换效率的途径与方法。

参考答案：1．当光线照射太阳能电池表面时，电池材料吸收一部分光子；

光子的能量传递给原子，使原子外层电子发生跃迁成为自由电子，并在 PN 结两侧集聚形成电势差；当外部接通电路时，在该电压的作用下，将会有电流流过外部电路产生一定的输出功率。因此太阳能电池产生电能的条件是：入射光的频率应不小于 PN 结中性区电子跃迁的临界频率。

2. 提高太阳能电池光电转换效率的途径与方法 (1) 提高入射光的频率；
(2) 研发新材料，降低电子的逸出功。

第七章 静电场

习题解答

一. 分析题

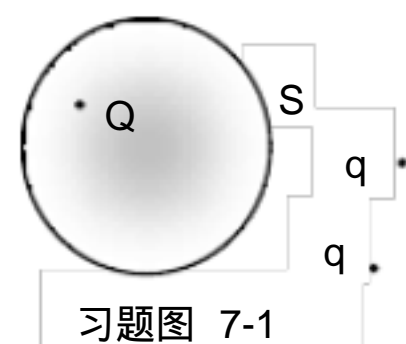
1. 如果在静电场中作一封闭曲面，曲面内没有净电荷，下面说法哪个正确。
(A) 通过封闭曲面的电场强度通量一定为 0，场强一定为 0；(B) 通过封闭曲面的电场强度通量不一定为 0，场强一定为 0；(C) 通过封闭曲面的电场强度通量一定为 0，场强不一定为 0；(D) 通过封闭曲面的电场强度通量不一定为 0，场强不一定为 0。

答：(C)

根据高斯定理：
$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$
，曲面的电场强度通量只与曲面内的电荷

有关，曲面上任意一点的电场强度与曲面内外的电荷都有关系。当曲面内没有净电荷时，曲面的电场强度通量一定为 0，但是曲面外部不一定没有电荷，所以曲面上的电场强度不一定为 0。

2. 如习题图 7-1 所示，点电荷 Q 被曲面 S 所包围，曲面外有两个点电荷电量均为 q，现将其中一个 q 移入曲面内，下面说法哪个正确。 (A) 曲面 S 的电场强度通量不变，曲面上各点场强变化； (B) 曲面 S 的电场强度通量变化，曲面上各点场强不变； (C) 曲面 S 的电场强度通量变化，曲面上各点场强变化； (D) 曲面 S 的电场强度通量不变，曲面上各点场强不变。



习题图 7-1

答：(C)

根据高斯定理： $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$ ，曲面的电场强度通量只与曲面内的电荷

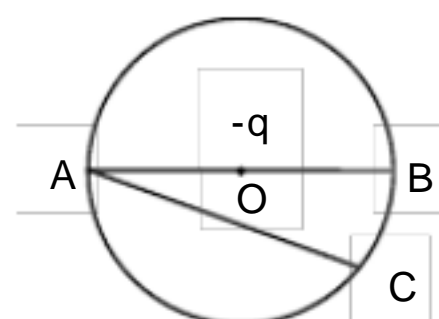
有关，曲面上任意一点的电场强度与曲面内外的电荷都有关系。所以当一点电荷从曲面外移近取面内后，曲面的通量要发生变化，曲面上的电场强度与电荷的位置有关，所以曲面上的电场强度也要发生变化。

3. 关于电场线，以下说法哪个正确。 (A) 电场线上各点的电场强度大小相等；(B) 电场线是一条曲线，曲线上的每一点的切线方向都与该点的电场强度方向平行；(C) 匀强电场中开始处于静止的电荷，在电场力的作用下运动的轨迹必与一条电场线重合；(D) 在无电荷的电场空间，电场线可以相交。

答：(C)

电场线上任意点的切线方向为该点处电场强度的方向；电场线密度表示该点处电场强度的大小；电场为有源场，任意电场线不相交；在均匀场中，电场强度处处相等；电荷在均匀电场中静止开始运动，其运动轨迹必沿与一条电场线运动。

4. 如习题图 7-2 所示，点电荷 $-q$ 位于圆心 O 处， A 、 B 、 C 为同一圆周上的三点。现将试验电荷从 A 点分别移动到 B 、 C 点，则从 A 点到 C 点电场力做功最大。请分析是否正确。

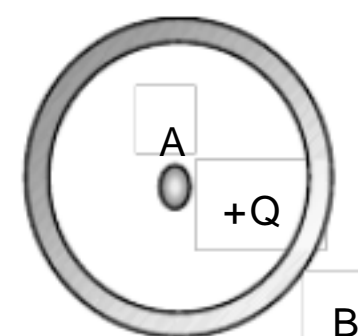


习题图 7-2

答：错误。

点电荷在空间产生的电场成球对称分布， A 、 B 、 C 三点离点电荷的距离相等，所以试探电荷在三点的电势相等，从而将一试验电荷从 A 点分别移动到 B 和 C 点，电场力做功都为 0。

5. 如习题图 7-3 所示，在一个原来不带电的外表面为球形的空腔导体 B 内，放置一帶有 $+Q$ 电荷的导体 A ，则空腔导体 B 的内表面不带电。请分析是否正确。



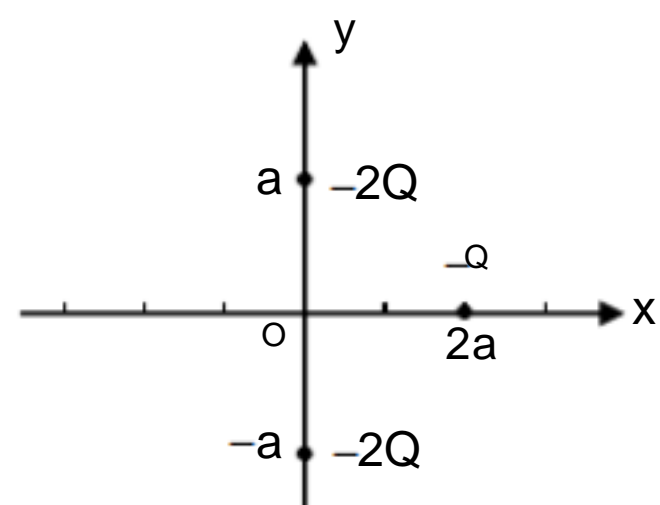
习题图 7-3

答：错误。

根据静电感应，当导体达到静电平衡时，导体内部电场强度处处为 0，根据高斯定理，导体内表面所带电荷与空腔导体包围的电荷代数和为 0，所以内表面带 $-Q$ 的电量。

三、综合题

1. 如习题图 7-4, 三个点电荷分别分布在 x, y 轴上。(1) 分析各点电荷在 O 点产生电场强度的方向;(2) 写出各点电荷在 O 点产生的电场强度的大小;(3) 计算 O 点的电场强度大小;(4) 计算 O 点电势的大小。



习题图 7-4

解:(1) $(0,a)$ 处点电荷在 O 点产生的电场方向从 O 点指向 y 轴正向;

$(0,-a)$ 处点电荷在 O 点产生的电场方向从 O 点指向 y 轴负向;

$(2a,0)$ 处点电荷在 O 点产生的电场方向从 O 点指向 x 轴正向。

$$(2) \quad E_a = \frac{Q}{2 \epsilon_0 a^2}; \quad E_{-a} = \frac{Q}{2 \epsilon_0 a^2}; \quad E_{2a} = \frac{Q}{16 \epsilon_0 a^2}$$

$$(3) \quad \vec{E} = \vec{E}_a + \vec{E}_{-a} + \vec{E}_{2a}$$

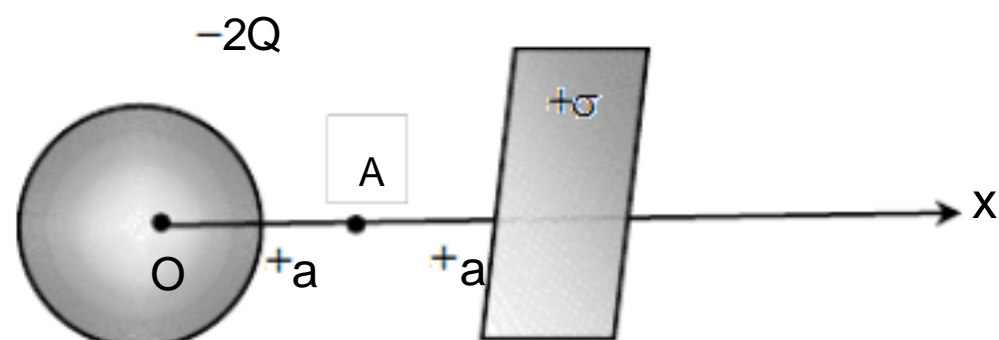
$$E_y = E_a - E_{-a} = 0$$

$$E_x = E_{2a} = \frac{Q}{16 \epsilon_0 a^2}$$

$$E = E_x = E_{2a} = \frac{Q}{16 \epsilon_0 a^2}, \text{ 从 } O \text{ 点指向 } x \text{ 轴正向}$$

$$(4) \quad V = \sum_i \frac{q_i}{4 \epsilon_0 r_i} = \frac{-2Q}{4 \epsilon_0 a} + \frac{-2Q}{4 \epsilon_0 a} + \frac{-Q}{8 \epsilon_0 a} = \frac{-9Q}{8 \epsilon_0 a}$$

2. 如习题图 7-5 所示, 有一半
径为 R 的均匀带电球壳, 所带电量为 $-2Q$, 在距 O 点 $2a$ 处放有一电荷面密度为 $+\sigma$ 的无限大带电平面, 带电平面与 x 轴垂直。(1) 试画出距离球心距离为 a 的 A 点的电场强度



习题图 7-5

方向;(2) 请计算带电球壳在 A 点处产生的电场强度大小, 并指出方向;(3) 请计算无限大带电平面在 A 点处产生的电场强度大小, 并指出方向;(4) 请计算 A

点处总的电场强度。

解：(1) A 点电场强度方向为从 A 点指向 x 轴负向；

(2) 由高斯定理得电球壳在 A 点处产生的电场强度大小

$$E_1 = \frac{2Q}{4\epsilon_0 a^2} = \frac{Q}{2\epsilon_0 a^2}$$

带电球壳在 A 处激发的电场的方向从 A 点指向 x 轴负向；

(3) 无限大带电平面在 A 点处产生的电场强度大小为

$$E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

无限大带电平面在 A 处激发的电场的方向从 A 点指向 x 轴负向；

(4) 由场强叠加原理可知

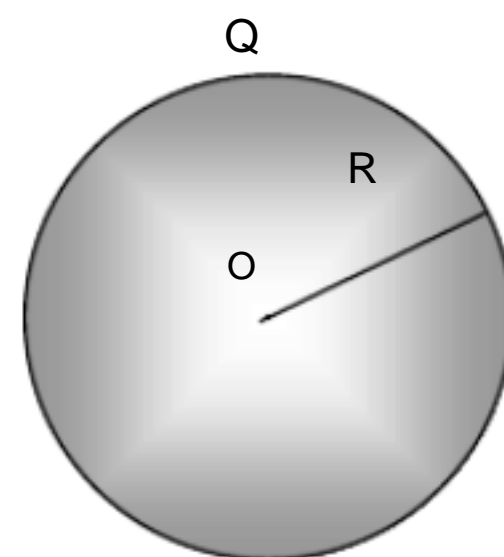
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

由于方向相同，则

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{Q}{2\epsilon_0 a^2}$$

方向：从 A 点指向 x 轴负向。

3. 如习题图 7-6 所示，半径为 R 的均匀带电球体。电荷量为 Q，电荷体密度为 ρ 。(1) 分析电荷对称性和电场分布情况，并画出电场线；(2) 利用高斯定理计算球内、外电场强度大小；(3) 试求球心处电势。



习题图 7-6

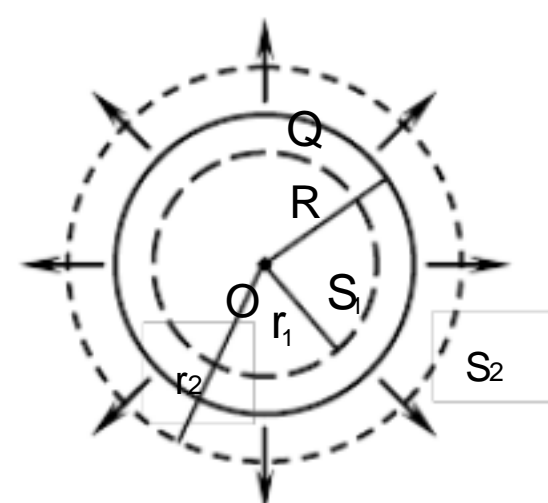
解：(1) 带电球体电荷分布具有球对称性，因此电场分布也具有球对称性；

(2) 按高斯定理

$$\oint_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_1 S_1 = \frac{\rho \cdot \frac{4}{3} r_1^3}{\epsilon_0} \quad (0 < r_1 < R)$$

$$\text{则 } E_1 = \frac{\rho r_1}{3\epsilon_0} = \frac{Q r_1}{4\epsilon_0 R^3}$$

$$\oint_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_2 S_2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (r_2 > R)$$



$$\text{则 } E_2 = \frac{Q}{4\epsilon_0 r_2^2}$$

(3) 球心电势

$$U = \int_0^{\infty} E \, dl = \int_0^R \frac{Qr_1}{4\epsilon_0 R^3} dr + \int_R^{\infty} \frac{Q}{4\epsilon_0 r_2^2} dr = \frac{Q}{8\epsilon_0 R} + \frac{Q}{4\epsilon_0 R} = \frac{3Q}{8\epsilon_0 R}$$

4. 假如在一次闪电中，云与地之间的电势差为 $2.0 \times 10^9 \text{ V}$ ，在此过程中有 50 C 的电荷被转移。请计算：(1) 转移这些电荷会释放多少能量？(2) 假如该闪电击中冰块，冰的融化热是 $3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}$ ，则它将融化多少冰？

解：(1) 转移这些电荷会释放的能量为

$$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2} \times 50 \text{ C} \times 2.0 \times 10^9 \text{ V} = 5 \times 10^{10} \text{ J}$$

(2) 融化冰的质量为

$$m = \frac{W}{L} = \frac{5 \times 10^{10} \text{ J}}{3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}} = 1.5 \times 10^5 \text{ kg}$$

5. 如习题图 7-7 所示，空间有两个均匀带电的无限大平行平面，面电荷密度分别为 σ 、 $-\sigma$ 。试求两个平面之间的电场强度。

解：正电荷在两个平面之间产生向右的电场强度，大小为：

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

负电荷在两个平面之间产生向右的电场强度，大小为：

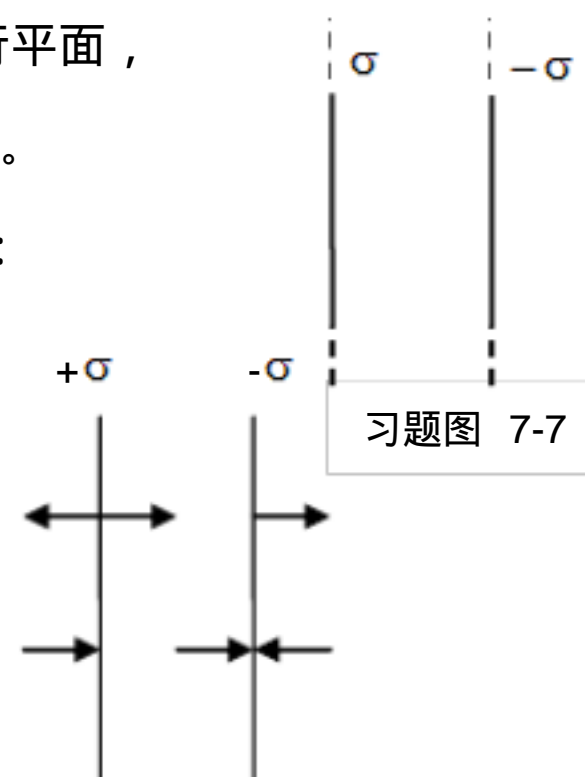
$$E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

两平面之间的电场强度大小为：

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

方向水平向右。

6. 离子推进器的工作原理为：先将气体电离，然后用电场力将电离产生的离子加速后喷出，以其反作用力推动火箭。这是目前最为经济的一种实用化的火箭



技术。如果用于产生电场的电压为 U ，火箭在单位时间内喷出了总质量为 M 的离子。设单个离子的质量为 m 、电荷量为 q 。请计算（1）离子从火箭中喷出的速率；（2）单位时间内火箭受到的平均推力的大小。

解：离子束中的离子是质量为 m ，电量为 q 正离子。根据牛顿第二定律有

$$m \frac{dv}{dt} = qE$$

由电场强度与电势的关系有

$$E = -\frac{dU}{dx}$$

可得

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{d(qU)}{dx} = -\frac{dE_p}{dx}$$

求解得： $\frac{1}{2}mv^2 + E_p = W_0$ ，其中 W_0 是初始能量，数值为 0；可以看出加速的过程是将电势能转换成了离子的动能。

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

由冲量定理的，单位时间推进力为

$$F = \frac{m'v - 0}{\Delta t} = \frac{\sqrt{2MqU}}{\Delta t}$$

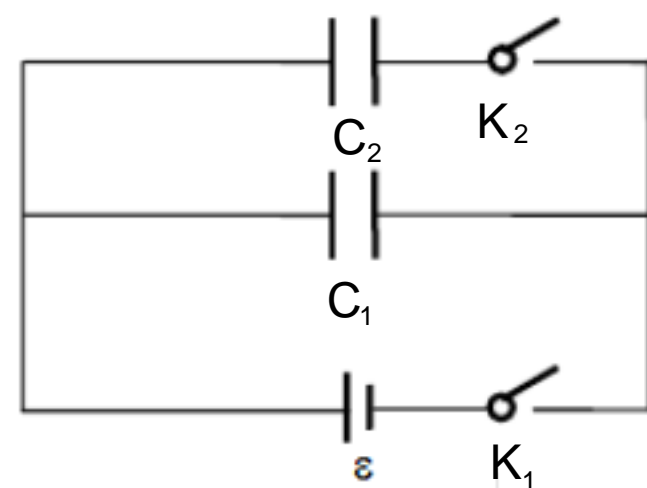
7. 如习题图 7-8 所示，电容器 $C_1 = 8.0 \mu\text{F}$ 和 $C_2 = 4.0 \mu\text{F}$ 串联后接到电压为 120V 的电路，其中 C_2 与开关 K_2 串联，开关 K_1 和 K_2 是断开的。首先闭合开关 K_1 给电容器 C_1 充电，充电完成后，断开 K_1 ，闭合 K_2 。请计算：（1）只闭合开关 K_1 后，电容器 C_1 中储存的能量；（2）断开 K_1 ，闭合 K_2 后，两电容器中储存的能量之和。

解：（1）只闭合开关 K_1 后，电容器 C_1 正极板上电荷为：

$$Q_0 = C_1 V_0 = 8.0 \mu\text{C} \times 120\text{V} = 960 \mu\text{C}$$

此时电容器 C_1 储存的电量为：

$$E_1 = \frac{1}{2} Q_0 V_0 = \frac{1}{2} \times 960 \times 10^{-6} \text{C} \times 120\text{V} = 0.058\text{J}$$



习题图 7-8

(2) 断开 K_1 ，闭合 K_2 后，两电容器正极板所带电量之和为 $960\ \mu\text{C}$ ，此时等效电容为

$$C = C_1 + C_2 = 8.0\ \mu\text{F} + 4.0\ \mu\text{F} = 12.0\ \mu\text{F}$$

则电路中的电压为

$$V = \frac{Q_0}{C_1 + C_2} = \frac{960\ \mu\text{C}}{8.0\ \mu\text{F} + 4.0\ \mu\text{F}} = 80\text{V}$$

两电容器中储存的总能量为

$$E = \frac{1}{2}C_1V^2 + \frac{1}{2}C_2V^2 = \frac{1}{2} \times 8.0 \times 10^{-6}\text{F} \times (80\text{V})^2 + \frac{1}{2} \times 4.0 \times 10^{-6}\text{F} \times (80\text{V})^2 = 0.0384\text{J}$$

和电容器 C_1 储存的电量相比较少了，减少的部分被电容器以热量消耗了。

思考题

思考题 7-1 人们在日常生活中，由于与其他物体的接触往往会带静电，由此在人与人、人与物体之间会产生电势差，电势差的存在又有可能引起瞬间放电。请分析在脱衣服、滑滑梯、汽车加油这些生活场景中存在的电势差，这些电势差有多大？可能造成什么样的危害呢？

参考答案：在人脱衣服时，衣服和衣服之间摩擦起电，电荷大量累计，使人和电脑间存在很大的电势差，急剧放电时，会烧毁电脑的主板；孩子在滑滑梯时，摩擦起电，在孩子身上累计大量的电荷，孩子和接应的人之间形成很大的电势差，瞬间放电会烧伤孩子的皮肤；汽车加油如果不熄火，油缸抖动会让油和油缸之间摩擦起电，形成很大的电势差，瞬间放电使汽油燃烧，汽车着火。

思考题 7-2 在高压设备中的金属部件使用什么外形更好？为什么？

参考答案：根据静电感应，感应电荷分布和曲率半径成反比，使空间电场分布也和曲率半径成反比，因此曲率半径越小的地方电场越大，容易产生尖端放电，所以在高压设备中，金属部件最好使用圆形，这样可以减少尖端放电，避免高压设备的损坏。

工程问题解析

等离子显示器

如图片 7-14 所示的等离子显示器 (PDP) 是利用气体放电的显示技术,它是继阴极射线管 (CRT)、液晶显示器 (LCD) 后的新一代显示器,其工作原理类似普通日光灯,它是由各个独立的荧光粉像素发光组合而成,每个像素由 3 个玻璃气室组成,大量的玻璃气室组成了显示阵列。



图片 7-14 PDP 电视

每个像素的 3 个玻璃气室均装有惰性气体,且 3 个气室分别涂有红色荧光粉、绿色荧光粉和蓝色荧光粉。在驱动电路的控制下,给每个气室加上高电压,使气室中的惰性气体分子发生电离,从而形成等离子体;等离子体在电压的作用下达到激发态,然后将向低态跃迁,导致其发射出紫外线,紫外线再激发玻璃气室里的荧光粉,使荧光粉发光,实现等离子成像。

请分析

1. 试阐明 PDP 工作原理。

2. 由 CRT 到 LCD,再到 PDP 然后到现在的 LED(发光二极管),电视机发展的物理基础是什么?

3. 请设想未来电视机的发展方向。

参考答案: 1. PDP 为等离子显示器,其工作原理类似于普通日光灯,它由几个独立的发光像素组合而成,每个像素由 3 个玻璃气室组成,大量的玻璃气室组成一个显示阵列。玻璃气室均装了惰性气体,通过给气室加高压电,使惰性气体电离,形成等离子体;等离子体在高压下达到激发态,然后从高能级跃迁到低能级,发出紫外线,紫外线激发荧光粉发光。

2. 显示器在不断升级,这主要是人们对电的认识不断完善,使电工技术得到发展。

3. 未来的电视机显示器,可能能在低压条件下工作,节能的同时对视力有保护作用。

第八章 稳恒磁场

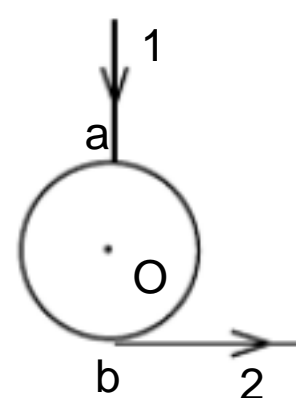
习题解答

一. 分析题

1. 对于磁感应强度 \vec{B} ，下列说法是否正确。（1）磁感应强度 \vec{B} 是反映磁场某点性质的物理量，磁场中任意一点都有一特定方向是 \vec{B} 的指向；（2）在磁场中一条给定的磁感线上，各点 \vec{B} 的大小相同，方向分别沿磁感线方向；（3）公式 $\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$ 和 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ 中， \vec{F} 与 \vec{B} 始终垂直。

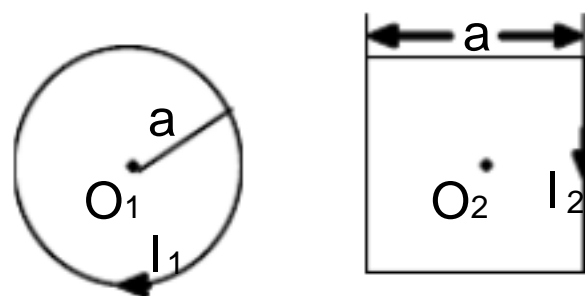
答：(1) 对；(2) 错；(3) 对

2. 如习题图 8-1 所示，在真空中一电流强度为 I 的电流由长直导线 1 沿半径方向经 a 点流入一由电阻均匀的导线构成的半径为 R 的圆环，再由 b 点沿切向从圆环流出，经长直导线 2 返回电源， a 、 b 两点和圆心 O 在同一直线上。请分析（1）长直导线 1 在圆环中心 O 处的磁感强度 \vec{B} 的大小；（2）长直导线 2 在圆环中心 O 处的磁感强度 \vec{B} 的大小；（3）圆环中心 O 处的磁感强度 \vec{B} 的大小和方向。



答：(1) $B_1 = 0$ ；(2) $B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R}$ ；(3) 因为 $B_3 = 0$ ，所以 $B = B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R}$ ，垂直纸面向外。

3. 如习题图 8-2 所示，有一半径为 a 的圆圈电流 I_1 和一边长为 a 载流的正方形线圈电流 I_2 。若要使两个线圈的中心 O_1 、 O_2 处的磁感强度大小相等，请问电流 I_1 与电流 I_2 的比值为多少？



习题图 8-2

答： $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2a}$

$$B_2 = 4 \times \frac{\mu_0 I_2}{4 \times \frac{a}{2}} (\cos 45^\circ - \cos 135^\circ) = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I_2}{a},$$

因为 $B_1 = B_2$, 所以 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{4\sqrt{2}}{1}$

4. 置于磁场中的磁介质，表面会形成磁化电流，请分析该磁化电流能否产生焦耳热？并说明原因。

答：不能，因为磁化电流不是传导电流。

5. 在工厂里搬运热钢锭时，能不能用电磁铁起重机？请说明原因。

答：不能，电磁起重机是利用线圈中的交变电流产生磁场来吸引起钢锭的，如果用热钢锭，会损坏线圈，导致不能产生磁场。

三、综合题：

1. 无限长直导线通有 50A 电流，在离导线 5.0cm 处有一电子以速度 $1.0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 运动。试求下列情况电子受到的洛伦兹力：（1）当电子的速度平行于导线时；（2）当电子的速度垂直指向于导线时；（3）当电子的速度垂直于导线和电子构成的平面时。

解：因为通电直导线周围磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

则电子在磁场中运动受到的洛伦兹力为

$$F_m = q \vec{v} \times \vec{B} = qvB \sin \theta$$

（1） $\theta = 90^\circ$ 时

$$F_m = qvB \sin \theta = qv \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin 90^\circ = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^7 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 50}{2\pi \times 5.0 \times 10^{-2}} \text{ N} = 3.2 \times 10^{-16} \text{ N}$$

（2） $\theta = 90^\circ$ 时

$$F_m = qvB \sin \theta = qv \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin 90^\circ = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^7 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 50}{2\pi \times 5.0 \times 10^{-2}} \text{ N} = 3.2 \times 10^{-16} \text{ N}$$

（3） $\theta = 0^\circ$ 时

$$F_m = qvB \sin \theta = qv \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin 0^\circ = 0 \text{ N}$$

2. 通有电流 1.5A、长为 30cm 的直导线被放置在磁感应强度为 $8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的匀强磁场中，磁场方向与导线成 30° 角，试求导线所受的作用力。

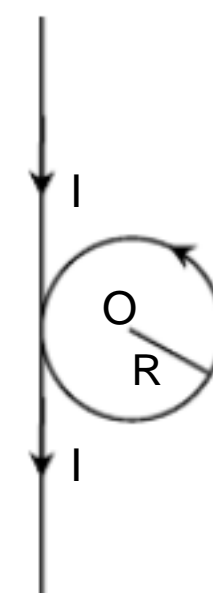
解：因为匀强磁场中直导线所受的作用力

$$F_m = BIL \sin \theta$$

所以导线所受的作用力为

$$F_m = BIL \sin \theta = 8.0 \times 10^{-2} \times 1.5 \times 0.3 \times \sin 30^\circ \text{ N} = 1.8 \times 10^{-2} \text{ N}$$

3. 如习题图 8-3 所示，一绝缘“无限长”直导线，载有电流 I ，并在其中部绕一半径为 R 的圆圈。试求：（1）直导线和圆圈两部分电流在 O 点产生的磁感强度；（2）圆心 O 点处的磁感强度是多少？



习题图 8-3

解：（1）直载流导线在圆心 O 点产生的磁感强度为 \vec{B}_1

\vec{B}_1 大小为

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2 R}$$

\vec{B}_1 方向垂直纸面向外；

圆线圈电流在圆心 O 点产生的磁感强度为 \vec{B}_2

\vec{B}_2 大小

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

\vec{B}_2 方向垂直纸面向外；

（2）圆心 O 点处的磁感强度为 \vec{B}

\vec{B} 大小

$$B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I (1 + 1)}{2\pi R}$$

\vec{B} 方向垂直纸面向外。

4. 传统的电视机利用显象管里的电子枪发射电子束，这些电子束击中彩色显像管的荧光屏后形成彩色图像。如果在电视显像管里，电子枪每秒可发射 5.6×10^{14} 个电子。电子束可看作长直电流，请计算：在电子束周围距电子束轴线 1.5mm 处，电子束产生的磁感应强度。

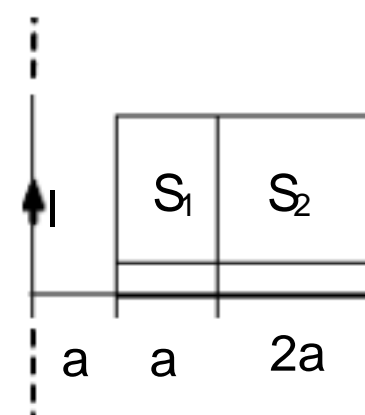
解：因为电子束形成的电流为

$$I = ne = 5.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 8.96 \times 10^{-5} \text{ A}$$

所以电子束产生的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} = \frac{4 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times 8.96 \times 10^{-5} \text{ A}}{2 \times 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1.20 \times 10^{-8} \text{ T}$$

5. 如习题图 8-4 所示，在通有电流 $I = 0.50 \text{ A}$ 的无限长直载流导线的右侧，放置了两个面积为 S_1 和 S_2 的矩形回路，两个回路的长为 $l = 0.20 \text{ m}$ ，宽分别为 a 、 $2a$ ($a = 0.10 \text{ m}$)，矩形回路的一边与长直载流导线平行，两者在同一平面。请计算 (1) 通过矩形回路 S_1 的磁通量是多少？(2) 通过矩形 S_2 的磁通量是多少？(3) 通过回路 S_1 和 S_2 的磁通量之比是多少？



习题图 8-4

解：无限长直载流导线周围磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2x}$$

在距离直导线 x 处取宽度为 dx 的小矩形，其磁通量为

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int \frac{\mu_0 I}{2x} l dx$$

(1) 通过矩形回路 S_1 的磁通量为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \int_a^{2a} \frac{\mu_0 I}{2x} l dx = \frac{\mu_0 I l}{2} \ln \frac{2a}{a} \\ &= \frac{4 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times 0.50 \text{ A} \times 0.20 \text{ m}}{2} \ln 2 \\ &= 1.74 \times 10^{-8} \text{ T} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(2) 通过矩形 S_2 的磁通量为

$$\begin{aligned} \phi_2 &= \int_{2a}^{4a} \frac{\mu_0 I}{2x} l dx = \frac{\mu_0 I l}{2} \ln \frac{4a}{2a} \\ &= \frac{4 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times 0.50 \text{ A} \times 0.20 \text{ m}}{2} \ln 2 \\ &= 1.74 \times 10^{-8} \text{ T} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(3) 通过回路 S_1 和 S_2 的磁通量之比为

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = 1$$

6. 一铜片厚度 $d = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，放在 $B = 3.0 \text{ T}$ 的匀强磁场中，已知磁场方向与铜片表面垂直，铜的载流子密度 $n = 8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ，当铜片中通有与磁场方向垂直的电流 $I = 200 \text{ A}$ 时，求（1）铜片两端的霍尔电势为多少？（2）铜片的霍尔系数为多少？

解：（1）铜片两端的霍尔电势为

$$\begin{aligned} U_H &= \frac{1}{ne} \cdot \frac{IB}{d} \\ &= \frac{200 \text{ A} \times 3.0 \text{ T}}{8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}} \\ &= 2.23 \times 10^{-5} \text{ V} \end{aligned}$$

（2）铜片的霍尔系数为

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{1}{ne} \\ &= \frac{1}{8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \\ &= 7.43 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{C} \end{aligned}$$

7. 将一个边长为 $a = 0.2 \text{ m}$ ，匝数 $N = 50$ 匝，通过电流为 2 A 的正方形线圈放在磁感应强度 $B = 0.05 \text{ T}$ 的均匀磁场中，（1）线圈处于什么方位时受到的磁力矩最大？大小是多少；（2）线圈处于什么方位时受到的磁力矩最小？大小是多少；（3）线圈由磁力矩最大方位转到磁力矩最小的方位这个过程中，磁力矩做的功大小是多少？是正功还是负功。

解：（1）因为磁力矩为

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

所以 $\vec{B} \perp \vec{e}_n$ 时，磁力矩最大，大小是

$$M = NISB \sin 90^\circ = 50 \times 2 \text{ A} \times (0.2 \text{ m})^2 \times 0.05 \text{ T} = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

（2） $\vec{B} // \vec{e}_n$ 时，磁力矩最小，大小是

$$M = NISB \sin 0^\circ = 0$$

（3）线圈由磁力矩最大方位转到磁力矩最小的方位这个过程中，磁力矩做的功大小为

$$W = \int_{90^\circ}^{0^\circ} M d\theta = \int_{90^\circ}^{0^\circ} Bms \sin \theta d\theta = \int_{90^\circ}^{0^\circ} 0.2 \sin \theta d\theta = 0.2 \text{ J}$$

是正功。

8. 一螺线管长 $l = 10\text{cm}$ ，匝数 $N = 200$ ，电流 $I = 100\text{mA}$ 。求：（1）管内为真空时的磁感应强度；（2）管内充满相对磁导率 $\mu_r = 4200$ 的磁介质时的磁感应强度。

解：（1）管内为真空时的磁感应强度大小是

$$\begin{aligned} B_0 &= \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I \\ &= 4 \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times \frac{200}{0.1\text{m}} \times 100 \times 10^{-3} \text{A} \\ &= 2.51 \times 10^{-4} \text{T} \end{aligned}$$

（2）管内充满相对磁导率 $\mu_r = 4200$ 的磁介质时的磁感应强度大小是

$$\begin{aligned} B &= \mu_r B_0 \\ &= 4200 \times 2.51 \times 10^{-4} \text{T} \\ &= 1.06 \text{T} \end{aligned}$$

思考题

思考题 8-1 当空间有两条平行的载流直导线时，人们发现，导线之间存在着相互作用，两电流同向时，出现相互吸引的现象，两电流反向时，则出现相互排斥的现象。为什么两电流会出现如此的相互作用呢？

参考答案：这源于磁场对电流的作用。两电流同向时，载流导线产生的磁场对彼此的作用力指向对方，所以出现相互吸引的现象；两电流反向时，载流导线产生的磁场对彼此的作用力背离对方，则出现相互排斥的现象。

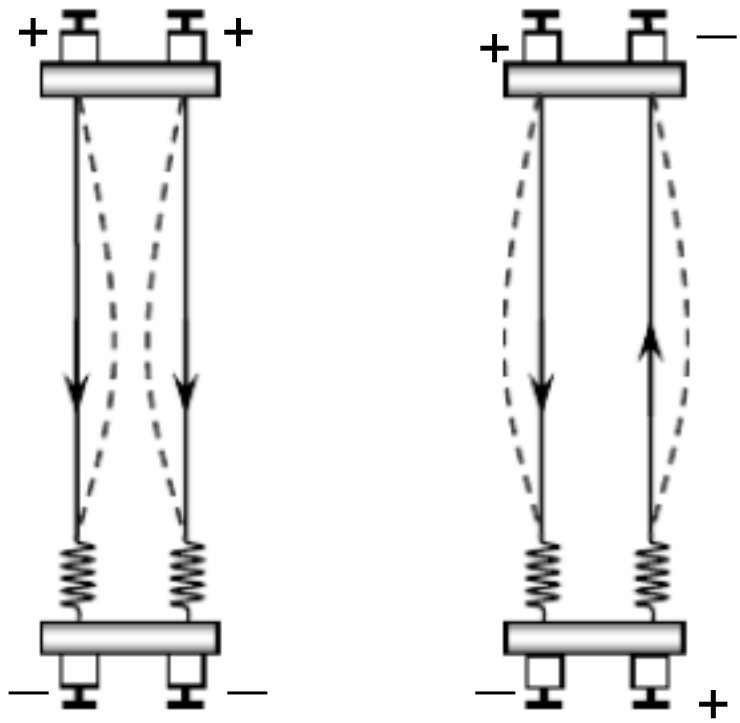
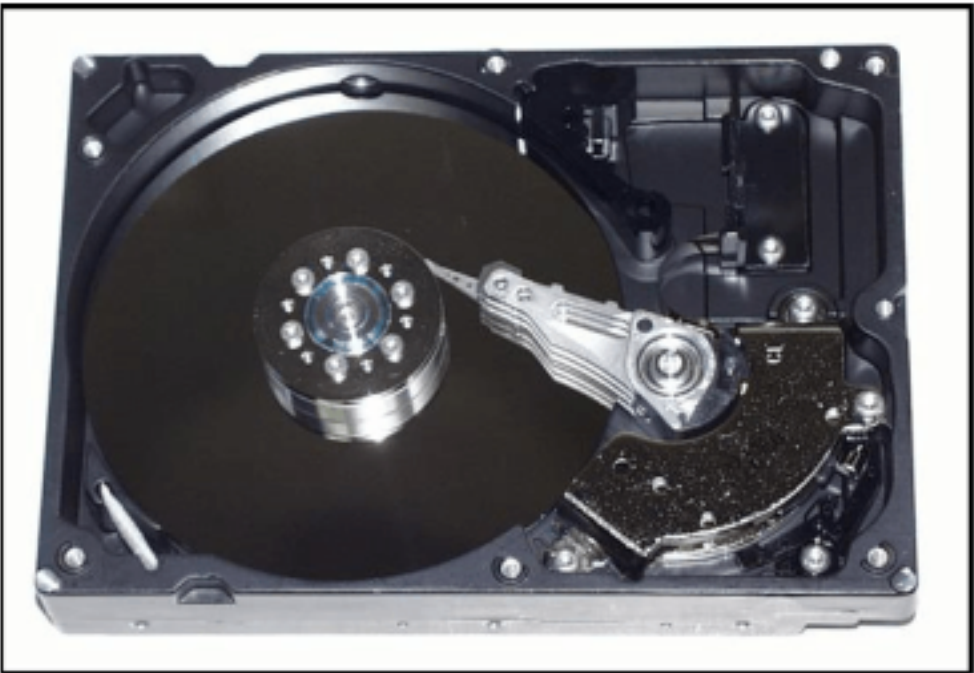


图 8-23 电流之间的相互作用

工程问题解析

巨磁阻效应及其应用

有些磁性材料的电阻率在有



图片 8-10 巨磁头

外磁场作用时与没外磁场作用时相比，存在巨大变化，这种现象称为巨磁阻效应。1988年，费尔和格林贝格尔各自独立发现了“巨磁电阻”效应，共同获得2007年诺贝尔物理学奖。目前研究发现在磁性材料和非磁性材料相间的多层薄膜层可以出现巨磁阻效应。

随着信息技术发展对存储容量的要求不断提高，硬盘体积不断变小，容量不断变大时，磁盘上每一个被划分出来的独立区域越来越小，记录的磁信号也越来越弱，用一般磁性材料做成的磁头来检测这种微弱的磁信号变化得很困难。由于巨磁电阻材料具有在非常弱小的磁性变化中能显现显著的电阻变化，人们利用巨磁电阻材料制作出了读取弱磁信号的磁头，称为“巨磁头”，如图片8-10所示。巨磁头的灵敏度极高，能够把非常弱的磁信号转换成清晰的电流变化，从而使计算机硬盘的容量有了很大的提高。目前，笔记本电脑、音乐播放器、数码相机等各类数码电子产品中所装备的硬盘，基本上都用“巨磁头”来读取信息。

二、请分析：

1、利用巨磁阻效应制造的磁头为什么能读出很弱的磁信号？

2、请利用巨磁阻效应材料，设计一个可以实现“通”“断”的装置，该装置可能在哪些地方有一定的应用。

参考答案：1、巨磁电阻材料具有非常弱小的磁性变化就能导致显著的电阻变化，人们制造出了用巨磁电阻材料制作的读取磁信号的磁头，称为“巨磁头”，其灵敏度极高，能够清晰读出较弱的磁信号，并且转换成清晰的电流变化，从而能清晰读出较弱的磁信号。

2、笔记本电脑、音乐播放器、数码相机等各类数码电子产品中所装备的硬盘，基本上都应用了“巨磁头”。

第九章 电与磁的联系

习题解答

一. 分析题

1. 一个人来到陌生的星球上，想利用一个灵敏电流计和一个线圈测量周围是否存在磁场，他应该怎样做？

答：将灵敏电流计与线圈连接，构成一个闭合回路。根据电磁感应定律，当改变闭合回路位置时，观察灵敏电流计的指针是否发生偏转可测量周围是否存在磁场。如果这个回路的周围存在磁场，当改变这个闭合回路的位置时，回路中有电流产生，灵敏电流计的指针将会偏转；反之，如果没有磁场存在，灵敏电流计的指针就不会偏转。

2. 将条形磁铁沿着铜环的轴线插入时，铜环中有感应电流和感应电场吗？若用塑料圆环替代铜质圆环，结果会怎样？

答：变化的磁场要产生感生电场。当条形磁铁插入时，不管是铜环还是塑料圆环，都存在变化的磁场，因此都会产生感生电场。要形成感应电流，需要有可以自由移动的电荷。铜线内有自由电子，感生电场就会驱动电荷移动产生感应电流，塑料环内没有可以自由移动的电荷，就不会形成感应电流。

3. 电风扇一般有几个档位，每档可产生不同的风速。扇叶不同的转速对应内部不同的电路，电路中串有一个电感线圈；改变电感线圈匝数可以调节电路的电流，达到改变扇叶转速的目的。请分析如何利用电感匝数的变化来改变电路的电流。

答：电风扇使用的是交流电，利用电感线圈来调节风速。电感线圈有几个抽头，不同的抽头对应线圈的匝数不同。电风扇的一个档位与电感线圈的一个抽头串联构成一个回路。当该回路通交流电后，电流的变化使电感线圈产生自感电动势，阻碍电流的变化。换挡时，回路与不同抽头串联，电感线圈的匝数变化，回路的自感电动势随线圈匝数的变化而变化，使回路中的电流变化，导致扇叶转速改变。

4. 实验室中一般可以获得的强电场为 $1 \times 10^6 \text{ V/m}$ 左右，强磁场约为 2.0 T 。

请比较电场能量密度和磁场能量密度的大小，并分析哪种场更利于储存能量？

答：磁场的能量密度：
$$\omega_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \times \frac{(2.0 \text{ T})^2}{4 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = 1.59 \times 10^6 \text{ J/m}^3$$

电场的能量密度：
$$\omega_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \times (1 \times 10^6 \text{ V/m})^2 = 4.42 \text{ J/m}^3$$

显然，磁场的能量密度远大于电场的能量密度，磁场更利于储存能量。

三、综合题

1. 子弹速度的测量可以采用下述方法：在子弹的尖端上装一根细小的永久磁针，再让子弹连续通过两个相距为 L 的线圈，线圈中将产生两个时间间隔为 Δt 的两个脉冲电流。（1）线圈中产生的感应电动势是动生电动势还是感生电动势？（2）由此测出子弹的速度是多少？

解：（1）两个线圈都没动，装在子弹尖端的磁针运动导致穿过线圈的磁通量发生变化而产生电动势，所以线圈中产生的感应电动势是感生电动势。

（2）在子弹的尖端上装一根细小的永久磁针，连续通过两个相距为 L 的线圈，测出在线圈中产生的两个脉冲电流的时间间隔 Δt ，因为

$$L = v \cdot \Delta t$$

所以可测出子弹的速度

$$v = \frac{L}{\Delta t}$$

2. 海洋学家依靠水流通过地磁场所产生的电动势，来探测海洋中水的流动情况。设在某处地磁场的竖直分量为 $0.70 \times 10^{-4} \text{ T}$ ，两个电极垂直插入被测的水流中，相距 200 m ，如果测得两电极之间的电势差为 $7.0 \times 10^{-3} \text{ V}$ 。请问：（1）产生的电动势是动生电动势还是感生电动势？（2）计算水流的速率。

解：（1）磁场没有发生变化，水作为导体在运动，因此产生的电动势为动生电动势。

（2）水作为导体在运动，产生的动生电动势为

$$\mathcal{E} = Blv$$

所以水流的速率为

$$v = \frac{\varepsilon}{Bl} = \frac{7.0 \times 10^{-3} \text{ V}}{7.0 \times 10^{-5} \text{ T} \times 200 \text{ m}} = 0.5 \text{ m/s}$$

3. 在我国 50 周年国庆盛典上，某型号的超音速歼击轰炸机在天安门广场上空沿水平方向自西向东呼啸而过。设北京地磁场的竖直分量为 $0.42 \times 10^{-4} \text{ T}$ ，飞机两边机翼总长 12.7 m ，飞机速度为 550 m/s 。(1) 计算该机两翼间的电势差；(2) 指出哪端电势高？

解 (1) 超音速歼击轰炸机在天安门广场上空沿水平方向自西向东呼啸而过，两机翼间会产生动生电动势，所以该机两翼间的电势差为

$$\varepsilon = Blv = 4.2 \times 10^{-5} \text{ T} \times 12.7 \text{ m} \times 550 \text{ m/s} = 0.29 \text{ V}$$

(2) 电动势的方向为 $\vec{B} \times \vec{v}$ 的方向，即：北端电势高。

4. 一呼吸器由 90 匝线圈绕制而成，当人由呼气转为吸气时，线圈面积由 0.12 m^2 变为 0.124 m^2 。设地球磁场为 $B = 0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$ ，与线圈之间的夹角为 60° ，人吸气的的时间间隔为 1.59 s 。(1) 分析人在一个吸气和呼气周期中呼吸器中产生电动势的方向？

(2) 试计算人吸气时呼吸器中产生的电动势。



习题图 9-1

解：(1) 在一个吸气或一个呼气周期中，线圈面积大小的变化相同，方向相反，其他因素不变，因此产生的电动势的大小相同，方向相反。

(2) 人吸气时呼吸器中产生的电动势

$$\begin{aligned} \varepsilon &= N \frac{d\phi}{dt} \\ &= N \frac{B \Delta S \cos 60^\circ}{\Delta t} \\ &= 90 \times \frac{5.0 \times 10^{-5} \text{ T} \times (0.124 \text{ m}^2 - 0.12 \text{ m}^2) \times 0.5}{1.59 \text{ s}} \end{aligned}$$

$$= 5.7 \times 10^{-6} \text{ V}$$

5. 补充题（缺图）（答案有差异）如习题图 9 - 1 所示,两无限长直导线 1 和 2 相距为 d ,载有大小相等、方向相反的电流 I , 电流变化率 $\frac{dI}{dt} = k > 0$ 。一个边长为 d 的正方形线圈位于导线平面内, 与导线 2 相距为 d 。试求：(1) 线圈中感生电动势的大小；(2) 线圈中感生电动势和感生电流的方向。

解：(1) 规定顺时针方向为线圈回路的正方向

载流为 I 的无限长直导线在与其相距为 r 处产生的磁感强度为：

$$B = \mu_0 I / (2 \pi r)$$

长直导线 1 在线圈中产生的磁通量为：

$$\phi_1 = \int_{2d}^{3d} d \cdot \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} dr = \frac{\mu_0 I d}{2 \pi} \ln \frac{3}{2}$$

长直导线 2 在线圈中产生的磁通量为：

$$\phi_2 = \int_d^{2d} -d \cdot \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} dr = -\frac{\mu_0 I d}{2 \pi} \ln 2$$

通过线圈的总磁通量

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = -\frac{\mu_0 I d}{2 \pi} \ln \frac{4}{3}$$

感生电动势为：

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 d}{2 \pi} \left(\ln \frac{4}{3} \right) \frac{dI}{dt} = \frac{\mu_0 d}{2 \pi} k \ln \frac{4}{3}$$

(2) 由 $\varepsilon > 0$ 和回路正方向为顺时针可知, ε 为顺时针方向, 线圈中的感应电流亦是顺时针方向。

6. 补充题（缺图）电子感应加速器是一种利用感生电场来加速电子的装置。如习题图 9 - 2 所示,设电子感应加速器中存在一个变化的磁场, 磁场在半径为 0.3m 圆柱形区域, 且 $\frac{dB}{dt} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ T/s}$ 。(1) 请分析电子感应加速器加速电子的原理；(2) 请分别计算在距圆柱形区域轴线 0.1m 处和 0.3m 处的感生电场强度；(3) 请分析磁场变化范围与感生电场范围的关系。

解：(1) 加速器中的变化磁场将在空间激发感生电场, 感生电场线为一系列绕

磁感应线的同心圆，若让电子沿切线方向射入磁场，电子将在感生电场力的作用下被加速，同时电子还受到受到空间磁场的洛伦兹力的作用，使电子在圆形轨道上运动。

(2) 根据化磁场与感生电场的关系

$$\oint_l E_k \cdot dl = - \iint_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$$

可知在 0.1m 处：

$$E_k \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot r^2$$

$$E_k = 1.0 \times 10^{-3} \text{ V/m}$$

在 0.5m 处：

$$E_k \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot R^2$$

$$E_k \cdot 2\pi \cdot 0.5 = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot 0.3^2$$

$$E_k = 1.8 \times 10^{-3} \text{ V/m}$$

(3) 磁场的变化范围在半径为 0.3m 的圆柱形区域内，
当 $r \leq 0.3\text{m}$ 时，由

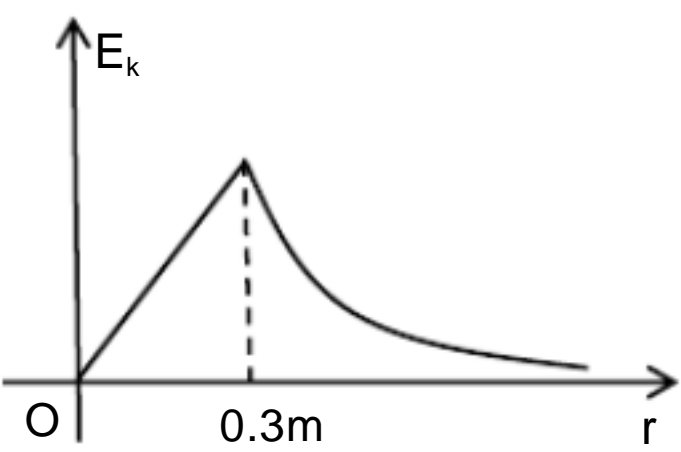
$$\oint_l E_k \cdot dl = - \iint_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$$

$$E_k \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot r^2 \quad E_k = r \times 10^{-2} \text{ V/m}$$

当 $r > 0.3\text{m}$ 时， $E_k \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot R^2$

$$E_k = \frac{R^2 \times 10^{-2}}{r} = \frac{9 \times 10^{-4}}{r} \text{ V/m}$$

可见，在 $r = 0.3\text{m}$ 时， E_k 值最大为 $3 \times 10^{-2} \text{ V/m}$ ，



虽然磁场的变化范围在半径为 0.3m 的圆柱形区域内，但产生的感生电场却可以在磁场区域以外的空间存在，将变化磁场的影
响由近及远地传播出去。

7.(补充题) 有一种测量通电螺线管中磁场的方法为： 将一面积很小的测量线圈放在螺线管中的待测位置， 然后给螺线管通上电流并立即改变电流方向， 此时测量线圈中将产生感生电动势， 与测量线圈串联的电流计将测出感应电量 Δq ， 根据 Δq 可以推算出测量线圈所处位置的磁感应强度， 即通电螺线管的磁感应强度。若测量线圈为 1000 匝，半径为 1.5cm，测量线圈与电流计串联回路的电阻为 1000Ω ，在改变螺线管电流方向的过程中测得 $\Delta q = 3.0 \times 10^{-7} \text{C}$ ，请计算螺线管中的磁感应强度的大小。

解：通过线圈回路的磁通量为 $\Psi = N\Phi = NBS$ ，当电流反向时，磁通量的变化量为

$$\Delta\Psi = 2NBS$$

线圈回路中产生的感应电动势为

$$\varepsilon = \frac{d\Psi}{dt}$$

线圈回路中产生的感应电流为

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R}$$

联立上面两式得

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{d\Psi}{R \cdot dt}$$

线圈回路中产生的感应电荷为

$$\Delta q = \frac{\Delta\Psi}{R} = \frac{2NBS}{R}$$

螺旋管中的磁感应强度为

$$B = \frac{\Delta q \cdot R}{2NS} = \frac{3.0 \times 10^{-7} \times 1000}{2 \times 1000 \times 3.14 \times (1.5 \times 10^{-2})^2} = 2.1 \times 10^{-4} \text{T}$$

思考题

思考题 9-1 电吉他的工作原理

电吉他发声的关键部位是拾音器， 图 9-3 所示为拾音器的结构图， 当歌手拨动金属吉他弦时， 拾音器将检测到弦的振荡信号， 并将信号传送到放大器之后发出声音。

请分析 : (1) 电吉他是怎样利用弦的振动来发
音的？ (2) 通过什么方法可以调节电吉他的音
色？ (3) 为什么电吉他的声音比普通吉他优
美？

参考答案：(1) 拾音器的结构如图所示，
磁体上绕着的线圈外接到放大器上。磁体产生
的磁场在金属吉他弦中也会产生南北极，这样
弦线也存在磁场。当弦线振荡时，穿过线圈中
的磁通量会发生变化，根据电磁感应定律，在线圈中会产生感应电流，感应电流
的变化与弦振荡的频率一致，这样感应电流与放大器连接，把弦线振荡的频率传
送到放大器和话筒；

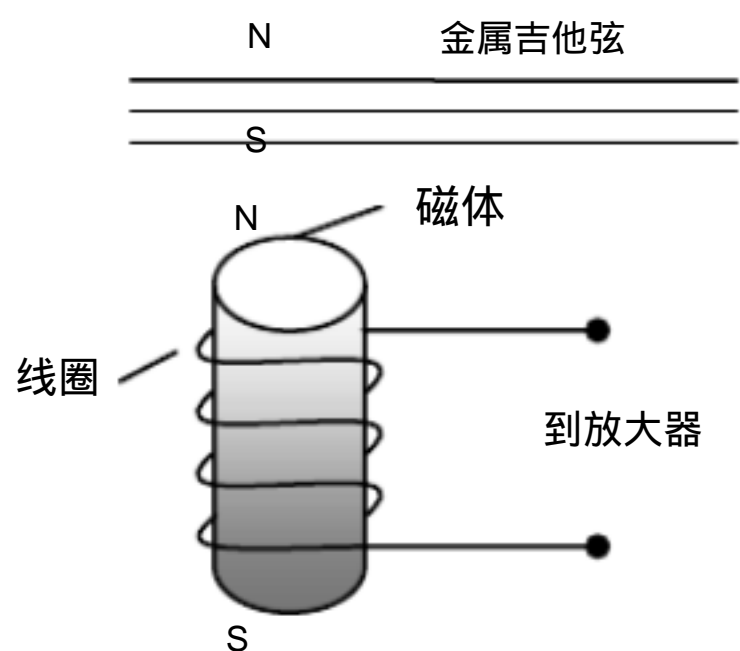


图 9-3 电吉他的拾音器

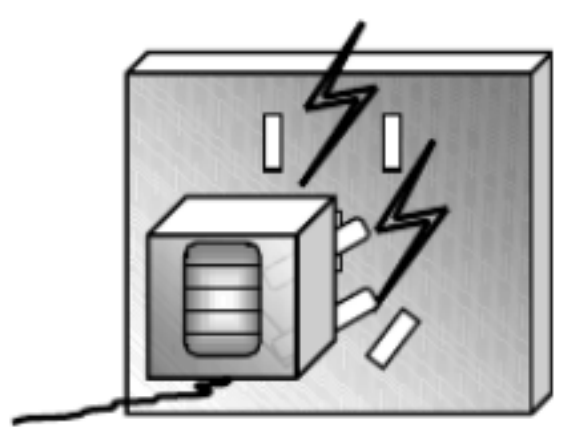
(2) 通过改变拾音器中导线的匝数即可改变线圈回路中的感应电流和感应电
动势的大小，调节电吉他的音色；

(3) 使用电吉他能更好地控制声音，能调节出更多的音效，所以能产生比普
通吉他更优美的声音。

思考题 9-2 在图 9-4(b)中，若感应电流的方向不满足楞次定律，当导体棒向右运
动时，其中的感应电流从上而下，这样会导致怎样的结果呢？请从能量守恒与转
化的角度进行分析。

参考答案：若感应电流的方向不满足楞次定律，则感应电流所产生的磁场力
将使导线作加速运动，只要用力使导线运动，那么它就会在磁场力的作用下越
来越快地运动下去，也就是我们可以用微小的功来获得无穷
大的机械能，这就是第一类永动机，显然这违反了能量守恒
定律。

思考题 9-3 如图片 9-6 所示，在人们拔插头的瞬间，经常看
到插头与插座之间会产生火花，请分析火花产生的原因。



图片 9-6 电火花的产生

参考答案：这是由于拔插头之前，电器及导线上有电
流，电流在导线周围建立了强大的磁场。当插头拔出时，电流在瞬间由强变为零，
电流激发的磁场也发生变化，导线因自感而感应出高电压，这样在插头与插座之
间就会产生电火花。

工程问题解析

金属探测器

图片 9-16 为一种 金属探测器，它是利用涡电流来探测和识别地下隐埋的金属物的装置，在军事上、考古、探矿、地质等领域有着广泛的应用。

如图 9-22 所示，金属探测器的核心结构为两个 LC 振荡回路，当发射线圈通有高频交流电时，会在周围空间产生变化的磁场，若在这个磁场附近存在金属物体（如导电矿石），金属物体内部将产生涡电流，涡电流也

会在空间产生磁场，此时接收线圈中磁场将发生变化，从而产生感应电流，电流计的指针发生偏转，由此推断金属物体的存在。

请分析：

- 1. 若探测到金属物的存在，如何判断目标物埋藏的深度？
- 2. 研究发现不同类型金属的导电性不同，改变磁场所需要的时间也不同。对图 9-22 所示的探测器作怎样的改进，才能使其具有判断金属类型的功能。

参考答案：1. 金属探测器根据目标物产生的磁场的强度，能近似地判定目标物埋藏的深度。目标物埋藏得越浅，接收线圈收集到的磁场强度就越大，产生的电流也越大。目标物埋藏得越深，磁场就越弱。如果超过了一定的深度，目标物磁场在地表处的强度过于微弱，就不能被接收线圈感测到。

2. 不同类型金属的导电性不同，改变磁场所需要的时间也不同。在接收电路中加入相位解调器，测出反应时间，并将实测数据同某一种类金属的反应时间值进行比较。探测器以视觉信号的形式，将目标物可能所处的金属类型范围告知探测者。

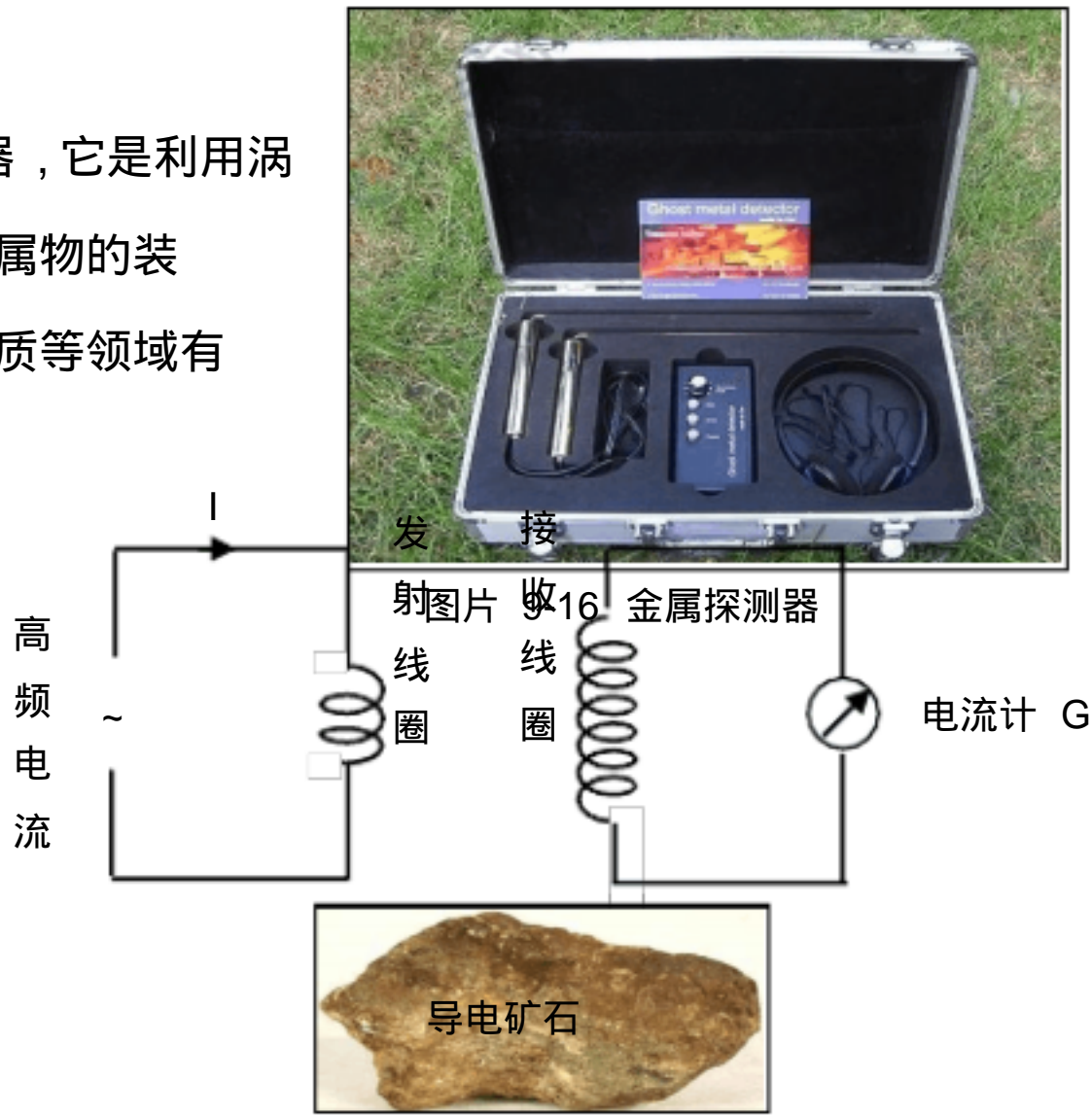


图 9-22 金属探测器原理

第十章 机械波

习题解答

一、分析题

1. 物体做简谐振动时，频率和波长满足什么关系：（A）振动频率越高，波长越长；（B）振动频率越低，波长越长；（C）振动频率越高，波速越大；（D）振动频率越低，波速越大。

答：（B）

由 $v = \frac{1}{T} = \frac{u}{\lambda}$ 可见，频率和波长成反比，因此振动频率越低波长越长。

而波速取决于介质的特性，与频率和波长无关。

2. 在有关一个物体运动的加速度与位移的关系式中，请问以下哪个属于简谐振动。（A） $a = 5x$ ；（B） $a = 5x^2$ ；（C） $a = -10x$ ；（D） $a = -10x^2$ 。

答：（C）

简谐振动是指运动参量随时间按余弦或正弦函数规律变化的振动。 根据简谐

振动方程为 $x = A\cos(\omega t + \varphi)$ 和加速度 $a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A\cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x$ ，对比可

见（C）所表示的关系属于简谐振动。

3. 双簧管由于两个簧片频率略有差别，在吹奏时出现时强时弱的悦耳声音。请分析（1）两个簧片吹奏出来的两个简谐振动有何异同？（2）在吹奏时出现时强时弱的悦耳声音的原因？

答：（1）两个簧片的频率略有差别，吹奏时两个簧片的振动方向相同，频率不同。（2）两个同方向不同频率但频率相差很小的简谐运动合成后，会出现合振动的振幅时而加强时而减弱的周期性变化，从而出现时强时弱的悦耳声音。

4. 如果一根线上的驻波由下列表达式表示 $y(t) = 5\cos(3x + \frac{\pi}{2})\cos(4t)(\text{mm})$ ，请分析（1）形成该驻波的两简谐波的振幅为多大？（2）在 $x = 0$ 处的振动是波腹还是波节？

答：（1）驻波的波函数为 $y = y_1 + y_2 = 2A\cos\frac{2x}{\lambda}\cos\omega t$ ， $2A = 5$ ， $A = 2.5\text{m}$ 。

(2) 将 $x = 0$ 代入驻波函数得驻波振幅 $5 \cos(0 + \frac{\pi}{2}) = 0$ ，因此在 $x = 0$ 处是波节。

三、综合题：

1. 一个扬声器的膜片作简谐运动，频率为 400Hz ，最大位移为 0.75mm ，求扬声器膜片振动的角频率、最大速率、最大加速度分别是多少？

解：扬声器膜片振动的角频率为

$$\omega = 2\pi \nu = 2 \times 3.14 \text{ rad} \times 400 \text{ Hz} = 2.51 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

最大速率为

$$v_{\max} = \omega A = 2.51 \times 10^3 \text{ rad/s} \times 0.75 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.88 \text{ m/s}$$

最大加速度是

$$a_{\max} = \omega^2 A = (2.51 \times 10^3 \text{ rad/s})^2 \times 0.75 \times 10^{-3} \text{ m} = 4.73 \times 10^3 \text{ m/s}^2$$

2. 在一个海港港口，海潮引起海洋的水面以涨落高度（最高水面到最低水面） $d = 0.12\text{m}$ 作简谐运动，周期为 20s ，以该水面的平衡位置为坐标原点， $t = 0$ 时刻，水面恰好处在负向最大位移处，试求：(1) 该水面的振动方程；(2) 此振动以波速 $v = 2\text{m/s}$ 沿 x 轴正方向传播时，形成的简谐波的波动表达式；(3) 该波的波长；(4) 水从最高水面下降 0.03m 所需要的时间。

解：(1) 水面振动的振幅为

$$A = \frac{d}{2} = 0.06\text{m}$$

圆频率和初相位为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{10} \text{ rad/s} \quad \varphi = \pi$$

所以水面的振动方程为

$$y = 0.06 \cos\left(\frac{2\pi}{10}t + \pi\right) \quad (\text{SI})$$

(2) 振动以波速 $v = 2\text{m/s}$ 沿 x 轴正方向传播时，形成的简谐波的波动表达式为

$$y = 0.06 \cos\left[\frac{1}{10}\left(t - \frac{x}{u}\right) + \right] = 0.06 \cos\left[\left(\frac{t}{10} - \frac{x}{20}\right) + \right] \quad (\text{SI})$$

(3) 该波的波长为

$$\lambda = u \cdot T = 2\text{m/s} \times 20\text{s} = 40\text{m}$$

(4) 由旋转矢量法得水从最高位置下降 0.03m 转过的角度为 60° ，则所需的时间为

$$t = \frac{60}{360} \times 20\text{s} = \frac{10}{3}\text{s} = 3.33\text{s}$$

3、假设一潜水艇声纳发出的超声波是一平面简谐波，其频率是 $5.0 \times 10^4 \text{ Hz}$ ，振幅是 $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，波长是 $2.85 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，波源振动的初相是 0，求：(1) 超声波的波函数；(2) 距波源 2m 处质点的振动方程；(3) 距波源 6m 和 6.05m 处两质点振动的相位差。

解：已知平面简谐波的频率 $\nu = 5.0 \times 10^4 \text{ Hz}$ 、振幅 $A = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、波长 $\lambda = 2.85 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、初相 $\phi = 0$
则圆频率为

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \times 5 \times 10^4 \text{ Hz} = \pi \times 10^5 \text{ rad/s}$$

(1) 超声波的波函数为

$$\begin{aligned} y &= A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \phi\right] \\ &= 1.2 \times 10^{-3} \cos\left(10^5 t - \frac{\omega x T}{\lambda}\right) \\ &= 1.2 \times 10^{-3} \cos(10^5 t - 220) \quad (\text{SI}) \end{aligned}$$

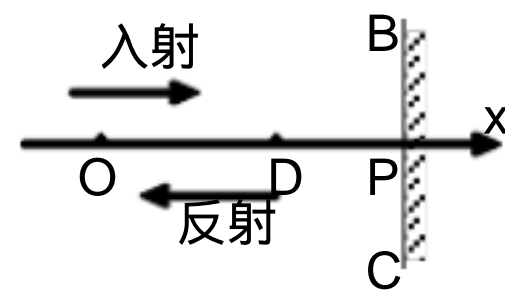
(2) 将 $x = 2\text{m}$ 代入上式得距波源 2m 处质点的振动方程为

$$y = 1.2 \times 10^{-3} \cos[10^5 t - 440] \quad (\text{SI})$$

(3) 距波源 6m 和 6.05m 处两质点振动的相位差

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x = \frac{2 \times 3.14 \text{ rad}}{2.85 \times 10^{-2} \text{ m}} \cdot 0.05 \text{ m} = 11 \text{ rad}$$

4. 如习题图 10-1 所示，假如有一蝙蝠发出的超声波是一平面简谐波，频率为 500Hz，振幅为 $1.5 \times 10^{-3} \text{m}$ ，波长为 0.06m，在 O 点处的振动初相位为 $\varphi = 0$ ，沿 x 轴正方向传播，在波疏媒质与波密媒质的界面 BC 上的 P 点发生反射， $\overline{OP} = 0.045 \text{m}$ ， $\overline{DP} = 0.01 \text{m}$ 。求：(1) 入射波的波函数；(2) 反射波的波函数；(3) 入射波与反射波的驻波方程。



习题图 10-1

解 (1) 已知入射波的频率 $\nu = 500 \text{Hz}$ 、振幅 $A = 1.5 \times 10^{-3} \text{m}$ 、波长 $\lambda = 0.06 \text{m}$ 、在 O 点处的振动初相位为 $\varphi = 0$ 则圆频率为

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \times 500 \text{Hz} = 1000 \text{ rad/s}$$

波速为

$$u = \lambda\nu = 0.06 \text{m} \times 500 \text{Hz} = 30 \text{m/s}$$

O 点的振动方程为

$$y = A \cos(\omega t + \varphi) = 1.5 \times 10^{-3} \cos 1000 t \quad (\text{SI})$$

则入射波的波函数为：

$$y = 1.5 \times 10^{-3} \cos 1000 \left(t - \frac{x}{u} \right)$$

将 $u = 30 \text{m/s}$ 代入得：

$$y = 1.5 \times 10^{-3} \cos 1000 \left(10t - \frac{x}{3} \right) \quad (\text{SI})$$

(2) 波从 O 点传到 P 点，经介质表面反射回 O 点时，相位的改变为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x = \frac{2\pi}{0.06 \text{m}} \times 0.045 \text{m} = 4\pi \text{ rad}$$

因此反射波在 O 点的相位与入射波在该点的相位一致，均为 0

所以反射波的波函数为：

$$y = 1.5 \times 10^{-3} \cos 100 \left(10t + \frac{x}{3} \right) \quad (\text{SI})$$

(3) 驻波方程为

$$\begin{aligned} y &= 2A \cos \frac{2x}{\lambda} \cos(\omega t + \varphi) \\ &= 3.0 \times 10^{-3} \cos \frac{100x}{3} \cos 1000t \quad (\text{SI}) \end{aligned}$$

5. 某火箭以 240m/s 的速率向某一固定不动的高杆飞去，同时发出频率为 $1.2 \times 10^3\text{Hz}$ 的声波，声波速度 340m/s 。求：(1) 固定在高杆上的探测器测量到声波频率；(2) 火箭上的探测器测量到从高杆上反散回来的声波的频率。

解：(1) 由多普勒效应知固定在高杆上的探测器测量到声波的频率为

$$\begin{aligned} v &= \frac{u}{u - u_s} \cdot v_0 \\ &= \frac{340\text{m/s}}{340\text{m/s} - 240\text{m/s}} \times 1.2 \times 10^3\text{Hz} \\ &= 4080\text{Hz} \end{aligned}$$

(2) 火箭上的探测器测量到从高杆上反散回来的声波的频率为

$$\begin{aligned} v &= \frac{u + u_s}{u - u_s} \cdot v_0 \\ &= \frac{340\text{m/s} + 240\text{m/s}}{340\text{m/s} - 240\text{m/s}} \times 1.2 \times 10^3\text{Hz} \\ &= 6960\text{Hz} \end{aligned}$$

思考题

思考题 10-1 蝙蝠是怎样利用超声波来感知猎物的距离、方位和速度的？蚊、蝇、蛾等昆虫用什么方法来逃避蝙蝠的捕捉呢？

参考答案：蝙蝠是利用自己发出的超声波与猎物相遇反射后，反射波和它自己发出的入射波之间的频率差异来判断猎物的距离、方位和速度的，即多普勒效应；同理昆虫也是利用多普勒效应来躲避蝙蝠的追捕的。

思考题 10-2：天坛“声学三奇” 图片

10-19 为北京天坛公园中的回音壁和圜丘。‘回音壁’为一道厚约 0.9m 的围墙，当人站在它的一端对着墙说话时，另一端的人用耳贴墙面就能听得非常清楚；

‘三音石’是位于回音壁中央地面的一个石板，当人站在此处击掌时，自己可以

至少能听到三次回声；圜丘是由大理石和青石砌成的半径为 11.5m 的圆形平台，当人站在圜丘中心叫喊时，他听到的声音被放大了，而且仿佛是从地下发声的。研究考证，天坛“声学三奇”之所以有如此奇特的现象，是因为古代的工匠巧妙地选择了建筑石材，并通过精心的布局利用声波的反射原理。请分析“声学三奇”是如何产生的？



图片 10-19 天坛“声学三奇”

参考答案：回音壁有回音效果的原因是：围墙由磨砖对缝砌成，光滑平整，弧度柔和，有利于声波的规则反射形成回音；同时围墙上端覆盖着琉璃瓦使声波不会因为散射而消失，加强了回音壁的回音效果。

三音石恰好位于回音壁的中央，击掌声传到回音壁上是等距的，被回音壁反射后，会聚在中央（即三音石处），这就听到了第一次回声；第一次回声又会等距地传到回音壁上，再次被反射回来，就可以听到第二次回声；同样，第三次第四次回声也可听到……；直到声能在传播和反射过程中被回音壁和空气完全吸收为止。

人站在圜丘中心叫喊时，因为青石、大理石的反射性能良好，声音反射时损失的能量不；同时圆形平台实际上并不平，而是从圆心向四周稍微倾斜，平台中心发出的声波被青石栏杆反射到稍有倾斜的台面，由于台面中心高，当被青石栏杆反射的声波到达台面并再次被台面反射时，其反射声波的方向就比平的台面稍高，直接传至人的上部；由于人听到反射声音的时间和发出声音时间相差很短，反射声就与自己发出的声音几乎重合，从而加强了自己发出的声音，因此听到的声音被放大了。由于人听到的反射声直接来自地上的台面，所以人听到的声音仿佛是从地下发声的。

工程问题解析

声呐技术

声呐是利用声波对水下物体进行探测和定位识别的方法及所用设备的总称。声呐是各国进行水下监视的主要技术，可对目标进行探测、分类、定位和跟踪等，还能实现水下通信和导航，从而保障舰艇、反潜飞机和反潜直升机的战术机动和水中武器的使用。如图片 10-20 所示。



图片 10-20 潜艇

请分析：

- 1．声呐是如何利用声波来进行工作的？
- 2．根据声呐的工作原理，从物理的角度分析声呐系统应该具有哪些主体结构？
- 3．潜水艇如何利用声呐技术对海底的暗礁进行探测和定位的？

参考答案：1. 声呐是利用的声波的多普勒效应来进行工作的，是利用水中声波对水下目标进行探测、定位和通信的电子设备，是水声学中应用最广泛、最重要的一种装置。

2．声呐系统主要包括两部分：干端和湿端。顾名思义，干端既水上部分，湿端既水下部分。

其中湿端主要是水声换能器或换能器基阵组成；而干端由信号源，发射设备，时空处理部分，判别显示部分构成。

3．潜水艇是利用自己发出的超声波与暗礁相遇反射后，反射波和它自己发出的入射波之间的差距来判断暗礁的距离、方位和速度的，即多普勒效应。

第十一章 光波

习题解答

一．分析题

1. 在相同的时间内，一束波长为 λ 的单色光在空气中和在玻璃中，有 (A) 传播的路程相等，走过的光程相等；(B) 传播的路程相等，走过的光程不相等；(C) 传播的路程不相等，走过的光程相等；(D) 传播的路程不相等，走过的光程不相等。

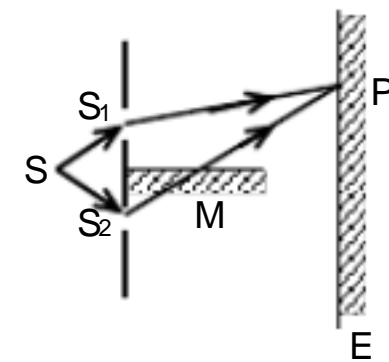
答：(C)

因为路程 $r = ut$ ，所以相同的时间内传播的路程不相等；而光程 $L = ct$ ，所以相同的时间内走过的光程。

2. 在双缝干涉实验中，屏幕 E 上的 P 点处是明条纹。若将缝 S_2 盖住，并在 S_1S_2 连线的垂直平分面处放一高折射率介质反射面 M，如图所示，则此时 (A) P 点处仍为明条纹；(B) P 点处为暗条纹；(C) 不能确定 P 点处是明条纹还是暗条纹；(D) 无干涉条纹。

答：(B)

因为 P 点处为明条纹，光程差 $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}$ ，放一高折射率介质反射面 M 后，光程差变为 $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2}$ ，所以 P 点处为暗条纹。

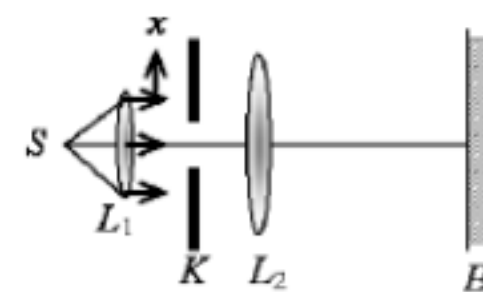


习题图 11-1

3. 在如图所示的单缝夫琅禾费衍射实验中，若将单缝沿透镜光轴方向向透镜平移，则屏幕上的衍射条纹 (A) 间距变大；(B) 间距变小；(C) 不发生变化；(D) 间距不变，但明暗条纹的位置交替变化。

答：(C)

因为光程差 Δ 未发生变化，所以变化衍射条纹不发生变化。

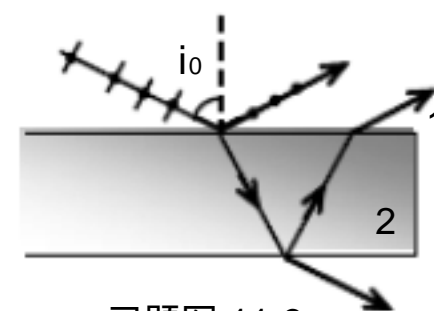


习题图 11-2

4. 一束自然光自空气射向一块平板玻璃 (如图)，设入射角等于布儒斯特角 i_0 ，则透射光 (A) 是自然光；(B) 是线偏振光且光矢量的振动方向垂直于入射面；(C) 是线偏振光且光矢量的振动方向平行于入射面；(D) 是部分偏振光。

答：(D)

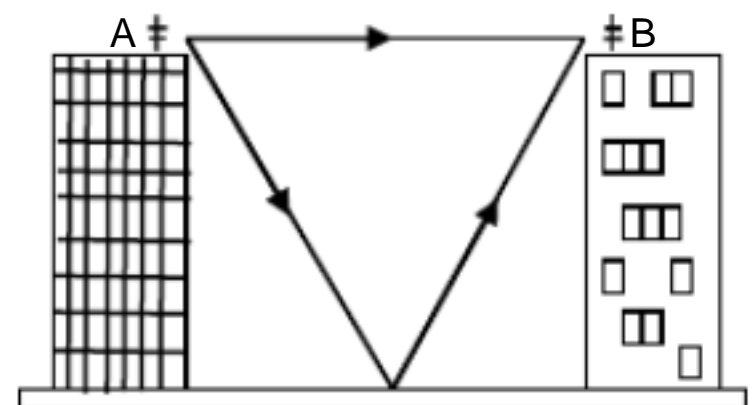
因为入射角等于布儒斯特角 i_0 时，反射光为线偏振光，透射光是部分偏振光。



习题图 11-3

三、综合题：

1. (答案对不上) 如习题图 11-4 所示, 移动通信发射台 A 发出的无线电波可能直接传到手机 B, 也可能经地面发射后传到手机, 这样在有些地方可能引起相消干涉而使信号减弱. 设一手机和发射机分别位于高度都是 60cm 的高楼上, 而工作频率为 98MHz. 若要求不引起相消干涉, 两楼间水平距离的最大有限宽度是多少? (注意无线电波在地面反射时有半波损失)。



习题图 11-4

解: 根据干涉相消条件可知当由 AB 和 ACB 两个路径达到 B 点的电磁波光程差恰好等于半波长的奇数倍时 B 点将没有信号。

令两楼间水平距离 AB 为 x , 则由 AB 和 ACB 两个路径达到 B 点的电磁波光程差为

$$\Delta = 2(60^2 + \frac{x^2}{4})^{\frac{1}{2}} - x + \frac{\lambda}{2}$$

根据干涉相消条件可知当由 AB 和 ACB 两个路径达到 B 点的电磁波光程差恰好等于半波长的奇数倍时 B 点将没有信号, 即:

$$\Delta = 2(60^2 + \frac{x^2}{4})^{\frac{1}{2}} - x + \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \times 3$$

其中

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{98 \times 10^6 \text{ Hz}} = 3.06 \text{ m}$$

求解方程可得两楼间水平距离的最大有限宽度为

$$x = 2350.41 \text{ m}$$

2. 波长为 587.5nm 的光波照射一 0.75mm 宽的狭缝, (1) 若衍射条纹中第一级暗纹到中央明纹的距离为 0.85mm, 则透镜的焦距为多少? (2) 中央明纹的宽度为多少?

解: (1) 由中央明纹宽度公式可得

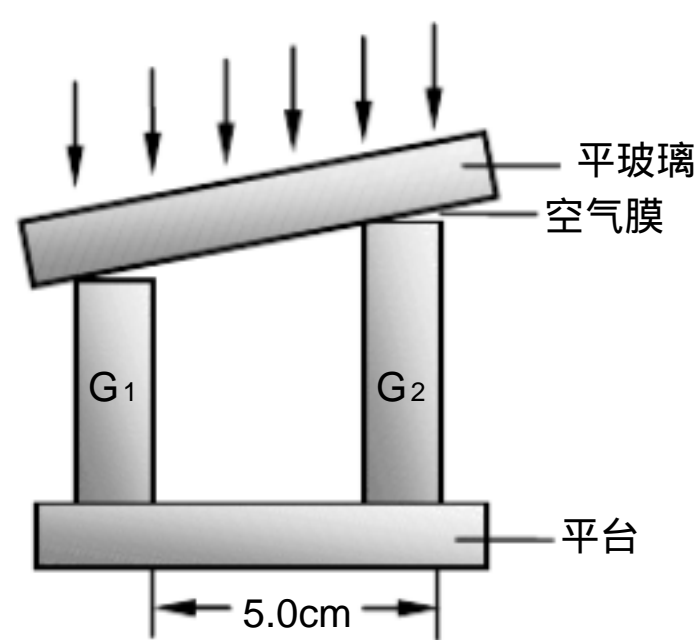
$$f = \frac{a l_0}{2 \lambda} = \frac{0.75 \text{ mm} \times 0.85 \text{ mm} \times 2}{2 \times 587.5 \times 10^{-6} \text{ mm}} = 1085 \text{ mm}$$

(2) 由题可知第一级暗纹到中央明纹的距离为中央明纹宽度的一半, 因此中

央明纹宽度为

$$l_0 = 2l = 0.85\text{mm} \times 2 = 1.7\text{mm}$$

3.(题中 L 与 l 不清楚) 块规是一种长度标准器。它是一块钢质长方体，两端面磨平抛光，很精确地相互平行，两端面间距离即长度标准。块规的校准装置如图所示，其中 G_1 是一块合格块规， G_2 是与 G_1 同规号待校准的块规。二者置于平台上，上面盖以平玻璃。平玻璃与块规端面间形成空气劈尖。用波长为 589.30nm 的光垂直照射时，观察到两端面上方各有一组干涉条纹。(1)



习题图 11-5

两组条纹的间距都是 $l = 0.50\text{mm}$ ，试求 G_1 、 G_2 的长度差；(2) 如何判断 G_2 比 G_1 长还是短？(3) 如两组条纹间距分别是 $l_1 = 0.50\text{mm}$ ， $l_2 = 0.30\text{mm}$ ，这表示 G_2 怎样的缺陷？如果 G_2 加工完全合格，应观察到什么现象？

解：(1) 玻璃与 G_1 、 G_2 的端面形成空气劈尖。则空气劈尖的顶角角度为：

$$\theta = \frac{\lambda}{2nl}$$

G_1 、 G_2 之间的距离 $L = 5.0\text{cm} = 50\text{mm}$ ，待测件与标准件之间的长度差为：

$$\Delta L = \theta L = \frac{\lambda L}{2nl} = \frac{589.3 \times 10^{-6} \text{mm} \times 50\text{mm}}{2 \times 1 \times 0.5\text{mm}} = 2.95 \times 10^{-2} \text{mm}$$

(2) 两组条纹中左边一级条纹若为暗纹则 G_2 比 G_1 长，若为亮纹则 G_1 比 G_2 长。

(3) 如两组条纹间距分别是 $l_1 = 0.50\text{mm}$ ， $l_2 = 0.30\text{mm}$ ，这表示 G_2 的端面不平行。若加工合格则只能看到暗级，观察不到条纹。

4. 在制作珠宝时，为了使人造水晶 ($n=1.5$) 具有强反射本领，就在其表面上镀一层二氧化硅 ($n=2.0$)。要使波长为 560nm 的光强烈反射，这镀层至少应多厚？

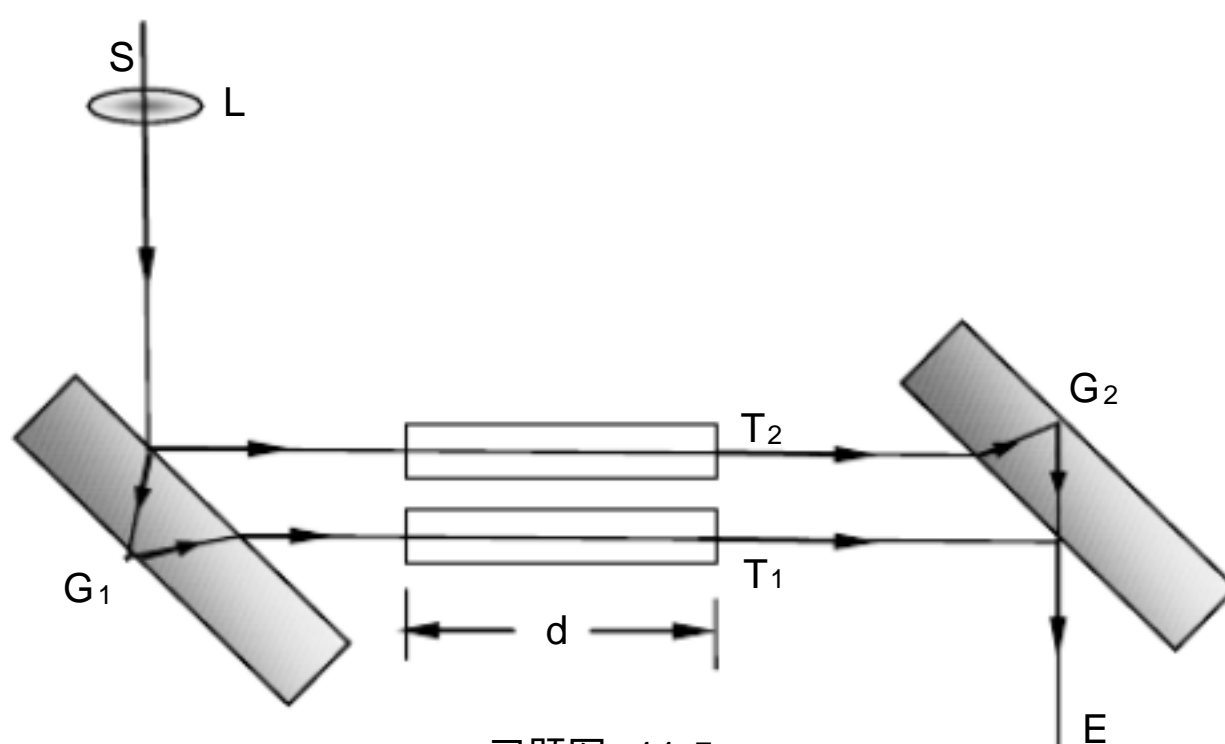
解：由题可知在增反膜上表面有半波损失，而在下表面则没有，因此总的光程差中应计算一个半波损失。则膜厚度应该满足：

$$2nd + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

当 $k=1$ 时厚度 d 有最小值

$$d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{560\text{nm}}{4 \times 2} = 70\text{nm}$$

5. (答案有差异) 雅敏干涉仪可以用来测定气体在各种温度和压力下的折射率，其光路如图所示。图中 S 为光源， L 为凸透镜， G_1 、 G_2 为两块完全相同的玻璃板，彼此平行放置， T_1 、 T_2 为两个等长度的玻璃管，长度均为 d 。测量时先将两管抽空，然后将待测气体徐徐充入一管中，在 E 处观察干涉条纹的变化，即可测得该气体的折射率。某次测量时，将待测气体充入 T_2 管中，从开始进气到达标准状态的过程中，在 E 处看到共移过 98 条干涉条纹。若光源波长 $\lambda = 589.3\text{nm}$ ， $d=20\text{cm}$ ，试求该气体在标准状态下的折射率。



习题图 11-5

解：条纹移动一个周期对应的光程差变化为 λ ，当其中一个管子充入气体后，两管的光程差正好对应 98 个条纹，则两管的光程差为 98λ ，即：

$$\Delta L = (n - 1)d = 98\lambda$$

则该气体的折射率为：

$$n = 1 + \frac{98\lambda}{d} = 1 + \frac{98 \times 589.3 \times 10^{-9} \text{m}}{20 \times 10^{-2}} = 1.000289$$

6. 氦氖激光（波长为 632.8nm ）入射到以狭缝上，问缝宽为多少时无法观察到暗条纹？（提示： $\sin \theta$ 不能大于 1）

解：要看不到暗纹则要求第一级暗纹的衍射角为 90 度。根据暗纹条件

$$a \sin \varphi = k\lambda$$

此时 $\varphi = 90^\circ$, $k = 1$, 则缝宽为

$$a = \lambda = 632.8\text{nm}$$

此时无法观察到暗纹。

7.(答案有差异) 太阳光入射到 2750 线/厘米的衍射光栅上, 第二级可见光谱 (400nm-700nm) 在屏幕上的总宽度为 1.75cm。试求透镜的焦距。

解：根据光栅方程可求出波长为 $\lambda_1 = 400\text{nm}$ 和 $\lambda_2 = 700\text{nm}$ 光的衍射角为

$$\varphi_1 = \arcsin \frac{k\lambda_1}{d} = \arcsin \left(\frac{2 \times 400 \times 10^{-9} \text{m}}{1 \times 10^{-2} \text{m} / 2750} \right) = 0.2218$$

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{k\lambda_2}{d} = \arcsin \left(\frac{2 \times 700 \times 10^{-9} \text{m}}{1 \times 10^{-2} \text{m} / 2750} \right) = 0.3952$$

则第 2 级衍射条纹的宽度为

$$\Delta x = \tan \varphi_2 f - \tan \varphi_1 f$$

可求得镜头焦距为：

$$f = \frac{\Delta x}{\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1} = \frac{1.75 \times 10\text{mm}}{\tan(0.3952) - \tan(0.2218)} = 91.32(\text{mm})$$

思考题

思考题 11-1 (1) 若用白光作为入射光, 在双缝干涉屏上将观察到怎样的干涉图样? 特征是什么? (2) 如果装置结构 (d' , d) 和波长 λ 发生变化, 条纹将如何变化?

参考答案 : (1) 白光入射将会看到除中央明纹是白光外, 其它干涉条纹都是彩色的。各个波长形成的条纹仍为明暗相间的直条纹, 但由于不同波长的衍射角不同, 从而形成彩色的光谱带。 (2) 双缝之间的距离 d 变大则条纹间距减小, 反之则增大; 双缝到屏幕的距离 d' 增大则条纹间距增大, 反之则减小; 波长 λ 增大

则条纹间距增大，反之则减小。

思考题 11-2 白光薄膜干涉 研究发现，昆虫翅膀与孔雀羽毛之所以呈现出五彩斑斓的颜色，昆虫翅膀与孔雀羽毛在自然状态下形成了一层厚度不均的薄膜。 (1)

请用薄膜干涉的原理，解释昆虫翅膀与孔雀羽毛在阳光下呈现出各种色彩的原因。(2)为什么在昆虫翅膀与孔雀羽毛上，观察到的各种颜色的分布不均匀？

参考答案：阳光在昆虫翅膀或孔雀羽毛上下两个表面发生反射，当某波长的反射光满足干涉相消条件时则在反射光中无法观察到该颜色的光，因此呈现出彩色。(2)由于昆虫翅膀或孔雀羽毛不同部位的厚度不同，满足干涉相消条件的波长也不一样，因此各种颜色的分布不均匀。

思考题 11-3 (1)当白光入射单缝上时，会形成怎样的衍射图样？(2)如何使衍射只能看到中央明纹？

参考答案：(1)白光入射单缝将形成彩色的衍射条纹，且波长较大的光波衍射条纹间距较大，出现在每个级次离中央明纹较远的地方，波长较小的光波衍射条纹间距较小，出现在每个级次离中央明纹较近的地方。(2)要只看到中央明纹意味着第一级衍射极小对应的衍射角为 90° 。根据式 11-14 可知当狭缝宽度等于波长时第一级极小的衍射角即为 90° 。

工程问题解析

全息技术

(缺图) 当人们照相时，普通底片通过入射光的强度来记录物体信息，而光波除了强度之外还有相位信息。相位信息与物体三维空间信息密切联系。普通照相丢失了相位信息，只能得到平面图像。那么，有没有方法可以同时记录光的强度和相位，从而获得立体图像呢？全息技术可以达到如此的效果。

全息技术利用光的干涉现象形成的干涉图样来成像，其成像方式如下：

(1) 如图 11-20(a) 所示，人为地用一束参考光 R 与物体的反射光(称为物光 O) 进行干涉，产生干涉图样。干涉条纹的分布与物光 O 的强度和相位都相关，其中包含了光的强度和相位信息，通过干涉图样来记录光的全部信息的方法称为全息技术。

(2) 若将光屏置于图 11-20 (a) 中的 H 处, 屏上可得到一幅干涉图样, 这个记录了干涉图样的光屏被称为 全息干版, 即为全息成像的相片。

(3) 全息图像无法像普通照片一样直接观看, 如图 11-20 (b) 所示, 必须再以照明光 C 照射在全息干版上产生衍射现象, 衍射光再现物光的强度和相位。人们在全息干版后面的区域 I, 就能看到和原始物体一样的三维立体图像。

请分析:

1. 在全息技术中, 全息干版上条纹间距不能太小, 否则记录信息的准确度将受到影响。请问可以采用什么方法来控制干涉条纹的间距, 以保证记录信息的准确度?

2. 若记录了干涉条纹的全息干板破损后, 只剩下原来的三分之一, 它是否可以完整再现原有图像, 为什么?

参考答案: 1. 双缝干涉中产生的干涉条纹间距正比于光波波长和狭缝到屏幕的距离, 而反比于双缝的间距。为了增加干涉条纹间距以便能被有效记录, 因此可以采用增加光源到记录介质的距离, 采用长波长或者减小两光束之间夹角。

2. 即使干板破损只剩下原来的三分之一也可以完整再现原有信息。光栅干涉中若将光栅的一部分遮住, 形成的干涉条纹分布并不变, 这是因为干涉条纹的分布是光栅的结构决定的, 而与光栅的大小无关。记录有条纹的干板是一个复杂的光栅, 即使缺失了一部分其条纹结构仍然是不变的, 因此仍可以完整再现原有信息。

第十二章 电磁波

习题解答

一、分析题

1. 关于电磁场的理论, 下面说法中哪个正确。(A) 变化的电场周围产生的磁场一定是变化的; (B) 变化的电场周围产生的磁场不一定是变化的; (C) 均匀变化的磁场周围产生的电场也是均匀变化的; (D) 振荡电场周围产生的磁场也是振荡的。

答: (B) (D)

因为 $\oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$, 所以均匀变化的磁场周围产生的电场是恒定的。

因为 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S (j_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$, 所以变化的电场周围产生的磁场不一定是

变化的。

2. 关于电磁波的传播, 下列叙述哪个正确。 (A) 电磁波频率越高, 越易沿地面传播; (B) 电磁波频率越高, 越易直线传播; (C) 电磁波在各种媒质中传播波长恒定; (D) 只要有三颗同步卫星在赤道上空传递微波, 就可把信号传遍全世界。

答: (B) (D)

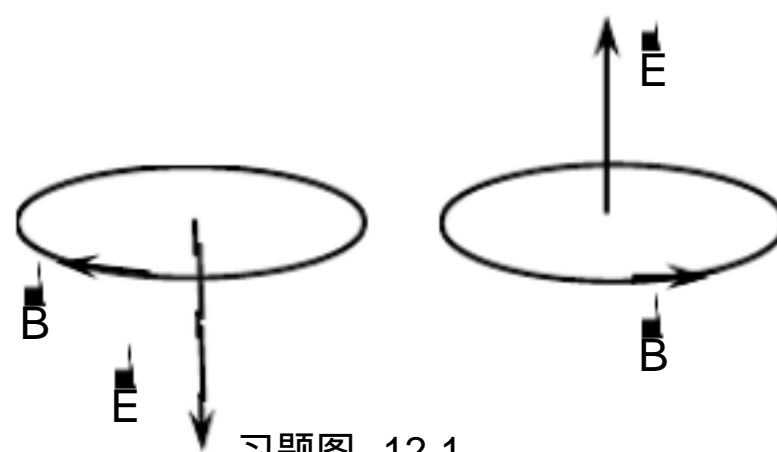
电磁波在不同介质中波长不同, 频率越高, 波长越短, 越不容易发生衍射, 化越易直线传播。三颗同步卫星能够覆盖整个地球表面。

3. 如果变化的电场 \vec{E} 产生磁场 \vec{B} , 请分析在习题图 12-1 所示的两种情况下电场强度的大小是在增加还是在减小。

答: 减小、减小。

因为 $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S (j_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$, \vec{H}

与 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 满足右手螺旋关系。



习题图 12-1

4. 对电磁波, (1) \vec{E} 、 \vec{H} 的方向与电磁波的传播方向三者满足什么关系?

(2) 证实电磁波存在的关键实验是哪个实验? 请分析其原理; (3) 请分析电磁波具有哪些基本性质。

答: (1) $\vec{E} \times \vec{H}$ 的方向就是电磁波的传播方向。

(2) 赫兹实验, 电磁振荡在空间传播形成电磁波。

(3) (a) 电磁波在真空中传播速度 $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$;

(b) 电磁波与机械波一样具有波动性；

(c) 电磁波与光波一样具有粒子性，其能量是量子化的。

5. 隐形飞机并不是将自己的形体隐藏起来让人们看不见，而是使雷达“看不到”它。隐形飞机是如何避开雷达的监测呢？

隐形飞机能吸收雷达发射的电磁波，使雷达不能接受到隐形飞机的反射波，从而避开雷达的监测。

三、综合题：

1. 在真空中传播的平面电磁波的电场强度为 $\vec{E} = 0.6 \cos(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi z}{3}) \vec{i}$ ， t 以 s 为单位， z 以 m 为单位。试求：(1) 电磁波的传播方向；(2) 电磁波的波长、频率；(3) 磁场强度的表达式。

解：(1) 电磁波的传播方向为 Z 轴正方向；

(2) 由电磁波的电场分量

$$\vec{E} = 0.6 \cos(2 \times 10^8 t - \frac{2\pi z}{3}) \vec{i}$$

可知

电磁振荡频率

$$\omega = 2 \times 10^8 = 2 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

所以 电磁波的频率为

$$\nu = 10^8 \text{ Hz}$$

因为 $\frac{\omega}{u} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{3}$ ，所以 电磁波的波长为

$$\lambda = 3 \text{ m}$$

(3) 由 电磁波的速度公式 $c = \frac{E_0}{B_0}$ 可知

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{0.6 \text{ N/C}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.2 \times 10^{-8} \text{ T}$$

由磁场强度与磁感应强度的关系可知

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.2 \times 10^{-8} \text{ T}}{4 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ A/m}$$

所以磁场强度的表达式为

$$\vec{H} = H_0 \cos(\omega t - \frac{\omega}{u} Z) \vec{j} = 1.6 \times 10^{-3} \cos(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi}{3} Z) \vec{j}$$

2. 一波长为 3.0m 的平面电磁波在真空中沿 x 轴正方向传播，该波的电场强度 \vec{E} 沿 y 轴方向，其振幅为 300V/m。请计算：（1）电磁波的频率为多少？（2）电磁波的磁场强度 \vec{B} 的方向和大小；（3）如果该波的电场强度 \vec{E} 的大小表示为 $E = E_m \sin(kx - \omega t)$ ，x 的单位为 m，t 的单位为 s， ω 的值为多少？

解：（1）电磁波的频率为

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{3} \text{ Hz} = 1.0 \times 10^8 \text{ Hz}$$

（2） \vec{B} 的方向为 Z 轴正方向

\vec{B} 的大小

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{300 \text{ N/C}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ T}$$

（3） $E = E_m \sin(kx - \omega t)$ ，其中

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \times 10^8 \text{ rad/s} = 6.3 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

3. 我国的第一颗人造地球卫星，用频率为 20.009MHz 和 19.995MHz 的无线电波播送《东方红》乐曲和传播实验数据。试求（1）这两种无线电波的波长？（2）将信息传回地面所需的时间分别是多少？（设地球半径为 6371km，卫星到接收站的距离为地球半径的 15 倍）。

解：(1) 这两种无线电波的波长分别为

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu_1} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{20.009 \times 10^5 \text{ Hz}} = 149.933 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{\nu_2} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{20.009 \times 10^5 \text{ Hz}} = 150.038 \text{ m}$$

(2) 卫星到接收站的距离为 $s = 15R$ ，两种无线电波的传播速度相同，将信息传回地面所需的时间均为

$$t = \frac{s}{c} = \frac{15 \times 6371 \times 10^3 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.319 \text{ s}$$

4. 根据宇宙大爆炸理论知道宇宙在膨胀，请分析 (1) 如何确定某一个星系离开地球的退行速度？(2) 假设测量到远方一个星系发来的光的波长是地球上同类原子发的光的波长的 1.5 倍，该星系离开地球的退行速度为多少？

解：(1) 由多普勒效应的波长公式：

$$\lambda = \lambda_0 + \nu_s T$$

可知：如果测出某个星系的某类原子发出的光波波长 λ 与地球上同类原子发出的光波波长 λ_0 的关系，可确定该星系离开地球的退行速度 ν_s

(2) 因为

$$\lambda = \lambda_0 + \nu_s T = 1.5\lambda_0$$

所以

$$\nu_s T = 0.5\lambda_0$$

星系离开地球的退行速度为

$$\nu_s = 0.5 \frac{\lambda_0}{T} = 0.5c = 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$$

科学问题解析

宇宙起源探秘

宇宙从何而来、往何处去？这对人们一直是个谜。1927 年比利时物理学家乔治·勒梅特基于爱因斯坦的广义相对论，首先提出了关于宇宙起源的大爆炸理论。如图片 12-5 所示，该理论认为宇宙是由一个极度致密、极度炽热的奇点开始膨胀到现在的状态。

1964 年美国科学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊，在用高灵敏度的号角式接受天线系统测量银晕气体射电强度时，意外地发现了一种温度仅为 3K 的微波背景辐射，这种宇宙微波背景辐射的产生，被科学家解释为宇宙大爆炸时发出的宇宙射线，由于宇宙在不断膨胀，星系间都以一定速度在远离，根据多普勒效应可知，这将导致人们观察到的宇宙射线的频率降低，甚至降至微波的范围，这称为电磁波谱线的“红移”。因此，宇宙微波背景辐射的发现成为了支持大爆炸理论的重要证据，1978 年，阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊获得了诺贝尔物理学奖。

请分析：

1. 什么是电磁波的多普勒效应？什么称为电磁波的“红移”和“蓝移”？
2. 根据宇宙射线和宇宙微波背景的频率，估算一下宇宙膨胀的速度。
3. 现在已有更多证据表明宇宙在膨胀，这对宇宙未来意味着什么？宇宙会有终结点吗？

参考答案：1. 光源发出频率为 ν_s 的电磁波，当光源和观察者在一直线上以

速度 v 相对运动时，观察者所接收到的频率 $\nu_R = \sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}} \nu_s$ 。当光源远离观察者运

动时，接收到的频率变小；反之，频率变大，这就是电磁波的多普勒效应。

根据电磁波的多普勒效应，当恒星远离我们而去时，我们接收到的来自恒星的光的频率变小，光的谱线就向红光方向移动，称为红移；如果恒星向着我们运动，光的谱线就向紫光方向移动，称为蓝移。

2. 根据电磁波红移现象测量宇宙膨胀的速度 :

以某一星系作为参考物体，该星系的速度

$$v = cZ \quad (c \text{ 为光速, } Z \text{ 为该星系的红移})$$

根据多普勒效应可推出红移

$$Z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1$$

其中 λ 为该星系的某一原子的谱线波长， λ_0 为实验室中测出的对应原子的谱线波

长，根据 $v = c\left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1\right)$ 估算出星系的速度 v 。

根据哈勃定律

$$v = Hd \quad (v \text{ 为星系的速度, } H \text{ 为哈勃系数, } d \text{ 为地球与星系的距离})$$

$$\text{宇宙的年龄: } T = \frac{1}{H} = \frac{v}{d} = \frac{c}{d} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \right)$$

$$\text{由此可以估算 宇宙膨胀的速度} = \frac{\text{星系与宇宙中心的距离 (待测)}}{\text{宇宙的年龄}}$$

3、现在已有更多证据表明宇宙的确在膨胀，这对宇宙未来意味着宇宙很可能永远膨胀下去。霍金预言宇宙的两种结局： (1)会永远的膨胀下去。 (2)或者会塌缩而在大挤压处终结。